



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES,
MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**ÚČINNOSTNÍ MAPA POHONU SE
SYNCHRONNÍM STROJEM**

EFFICIENCY MAP OF SYNCHRONOUS MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Gargulák

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radomír Pruša

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Jiří Gargulák**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Radomír Pruša**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Účinnostní mapa pohonu se synchronním strojem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem bakalářské práce je sestavení účinnostní mapy pohonu se synchronním motorem. Současně se předpokládá vytvoření interpolačního algoritmu pro aplikaci na dané účinnostní mapě. Samotná práce bude doplněna o literární rešerši na téma ztráty v pohonech, účinnostní mapy a jejich měření.

Cíle bakalářské práce:

Literární rešerše na téma ztráty v pohonech se synchronním motorem, účinnostní mapy a jejich měření. Návrh algoritmu pro výpočet účinnostní mapy pohonu se synchronním motorem, napájeného z frekvenčního měniče ze zadaných hodnot v co největším rozsahu zatěžovacích momentů a otáček. Vytvoření programu nebo skriptu, kterým bude navržený algoritmus implementovat.

Seznam doporučené literatury:

ROUBÍČEK, O. Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-092-X.

DRURY, B. Control techniques drives and controls handbook, 2nd edition. IET, 2009. ISBN 978--84919-013-8.

PYRHONEN, J., HRABOVCOVÁ V. a SEMKEN S. Electrical machine drives control: an introduction. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2016.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předmětem práce jsou interpolační metody aplikované na účinnostních mapách synchronních servomotorů. Pro vytvoření účinnostních map je použito interpolace bilineární, nejbližší soused a vážené inverzní vzdálenosti. Součástí práce je měření účinnosti na lineárním pohonu jedné osy obráběcího stroje, který je tvořen měničem, synchronním strojem a kuličkovým šroubem. Dalším předmětem této práce také řešerše, zabývající se ztrátami v synchronním motoru, frekvenčním měniči a v kuličkovém šroubu.

ABSTRACT

Subject of this bachelor thesis is application of interpolation on efficiency maps of synchronous servo-engines. Nearest neighbor interpolation, inverse distance weighting and bilinear interpolation is used. Another part of this thesis is measuring on drive of one axis on machine tool, which is made out of frequency convertor, synchronous engine and a ball screw. Also another subject of this thesis is research of power losses in synchronous engine, frequency convertor and ball screw.

KLÍČOVÁ SLOVA

synchronní motor, ztráty, interpolační metody, metoda vážené inverzní vzdálenosti, metoda bilineární, metoda nejbližší soused, měření účinnosti

KEYWORDS

synchronous engine, power losses, interpolation methods, inverse distance weighting method, bilinear method, nearest neighbor method, efficiency measuring

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GARGULÁK, Jiří. *Účinnostní mapa pohonu se synchronním strojem*. Brno, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124849>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Radomír Pruša.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Ing. Radomíru Prušovi za spolupráci, pomoc a ochotu kterou mi poskytl při vypracování této bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Radomíra Pruši a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 4.6.2020

.....

Jiří Gargulák

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	ZTRÁTY	15
2.1	Ztráty v motoru	15
2.1.1	Ztráty mechanické	15
2.1.2	Ztráty v magnetickém obvodu	16
2.1.3	Ztráty ve vinutí	17
2.1.4	Ztráty dodatečné	17
2.2	Ztráty v měniči	17
2.2.1	Přepínací ztráty	17
2.2.2	Ztráty vedením	19
2.3	Ztráty v kuličkovém šroubu	19
3	ÚČINNOSTNÍ MAPY POHONU SE SYNCHRONNÍM MOTOREM	22
3.1	Požadavky na motor	22
3.2	Zkušební metody	22
3.2.1	Metoda přímého měření příkonu a výkonu	22
3.2.2	Součet ztrát se zkouškou při plném zatížení a zkouškou na krátko	23
3.2.3	Součet dílčích ztrát bez zkoušky při plném zatížení	24
4	INTERPOLAČNÍ METODY	25
4.1	Metoda nejbližší soused	26
4.2	Metoda bilineární	27
4.3	Vážené inverzní vzdálenosti	28
5	VYTVÁŘENÍ A IMPLEMENTACE PROGRAMŮ	32
5.1	Vytváření interpolačních programů	32
5.2	Porovnání interpolačních funkcí	35
5.2.1	Chybovosti jednotlivých interpolačních metod	37
5.3	Implementace všech programů	38
6	MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT	39
6.1	Napájení pomocí SINUMERIC 840D sl	40
6.2	Naměřené hodnoty	40
6.3	Zpracování naměřených dat	42
6.3.1	Úprava interpolované plochy	42
6.4	Porovnání s daty udávaných výrobcem	44
6.4.1	Porovnání v bodech, ve kterých udává účinnost výrobce	44
6.4.2	Porovnání v bodech, na kterých byla změřena účinnost	46
6.4.3	Porovnání v bodech, které nebyly naměřeny ani je neudává výrobce	46
7	ZÁVĚR	47
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	51
	SEZNAM PŘÍLOH	53

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá ztrátami v synchronním motoru, v měniči a mechanickými ztrátami, které vzniknou při použití servopohonu v kombinaci s kuličkovým šroubem. Dále je předmětem práce vytvoření skriptů v programu MATLAB. Účel těchto skriptů je vytvořit ze zadaných dat pomocí interpolací účinnostní mapu motoru.

Dalším cílem této práce je měření a zpracování dat. Měření bude probíhat na pohonu jedné osy obráběcího stroje, který se skládá z měniče, synchronního motoru s permanentními magnety a kuličkového šroubu. Naměřená data se následně upraví a pomocí interpolačních algoritmů se vytvoří účinnostní mapa.

V následujících kapitolách jsou podrobně popsány kromě ztrát také principy jednotlivých interpolací a jejich použití. Dále je v této práci zahrnuto také porovnání účinnostní mapy vytvořené z naměřených hodnot s mapou, kterou udává výrobce.

2 ZTRÁTY

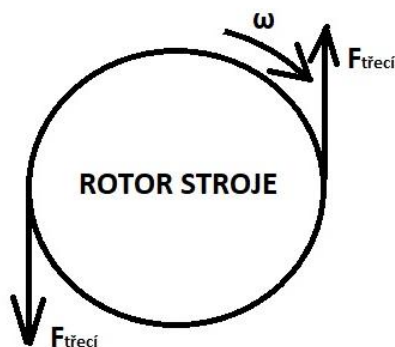
2.1 Ztráty v motoru

V každém elektrickém stroji se část přiváděné energie mění v energii tepelnou, která se ve stroji nevyužije a představuje ztráty. Velikost ztrát určuje účinnost stroje a jeho ekonomické využití [1].

Ztráty lze rozdělit na:

2.1.1 Ztráty mechanické

ΔP_{mech} jsou způsobeny třením. Konkrétně třením v uložení hřídele, či třením o vzduch částí, která rotuje (viz. Obr. 1). Také ventilátor, potřebný k vytvoření proudu chladicího vzduchu, způsobuje ztráty (ztráty ventilační). Pro výpočet mechanických ztrát synchronního stroje se používá více vztahů (záleží na typu motoru).



Obr. 1 – Zjednodušená interpretace tření rotoru o vzduch

Pro stroj s hladkým rotorem:

$$\Delta P_{mech} = 0,9 \cdot v^{2,5} \cdot D_r \cdot \sqrt{L} \quad (1)$$

kde v představuje obvodovou rychlost rotoru, D_r je průměr rotoru a L je celková délka statoru [2].

Je nutné podotknout, že existuje mnoho vzorců z různých publikací, neboť jsou odhadovány, nebo se na ně přišlo experimentálně. Existuje totiž spousta různých typů motorů s různými typy chlazení (které ovlivňuje tyto vzorce a následné ztráty).

Existují i výpočty pro stroj s vyniklými póly, ale těmi se tato práce nezabývá. Výpočet pro mechanické ztráty na těchto strojích naleznete zde [2].

2.1.2 Ztráty v magnetickém obvodu

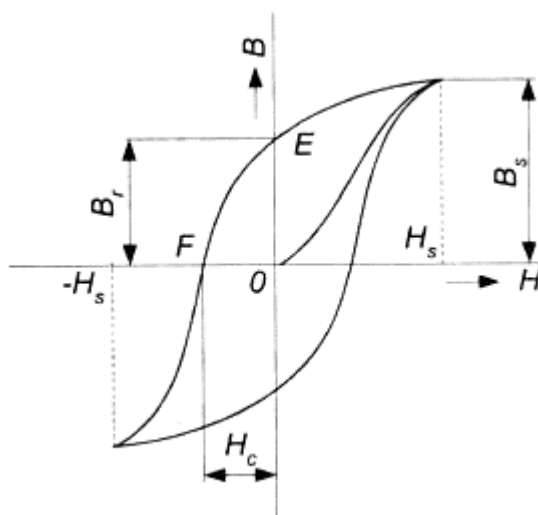
ΔP_{Fe} (ztráty v železe), se skládají ze ztrát hysterezních ΔP_h a ztrát způsobené vířivými proudy ΔP_v . Pro určení těchto ztrát se používají tyto vztahy:

$$\Delta P_h = k_n \cdot f \cdot B_m^n \cdot m \quad (2)$$

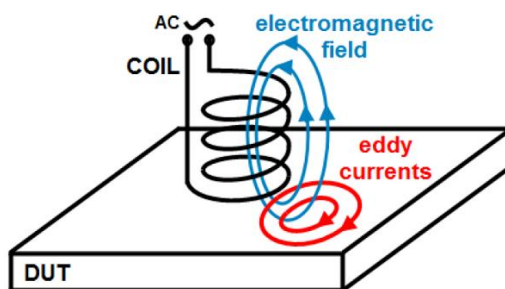
$$\Delta P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m \quad (3)$$

kde k_n a k_v jsou koeficienty, které závisí na materiálu a tloušťce plechů, B_m je hodnota maximální magnetické indukce, m je hmotnost materiálu s magnetickými vlastnostmi a f je frekvence. Výpočet ΔP_h (2) si také lze představit jako plochu hysterezní smyčky (viz. Obr. 2), násobenou objemem feromagnetika a frekvencí. Ve výpočtu ΔP_v (3) jsou frekvence a magnetická indukce dominantní, neboť se v něm vyskytují ve kvadrátu. Vířivé proudy jsou způsobeny tím, jak se v materiálu vytváří další magnetické pole, které má opačný směr, jako pole budící (viz. Obr. 3).

Tyto ztráty se vyskytují především ve statoru stroje. Rotorové magnetické ztráty synchronního motoru jsou principiálně nulové. Je-li motor napájen přímo ze sítě, jsou vířivé i hysterezní ztráty způsobovány 1. harmonickou frekvencí síťového napětí. Je-li motor řízen sinusovým PWM, kromě 1. harmonické se v železe vyskytují ztráty způsobené všemi vyššími harmonickými, ovšem tyto ztráty uvádíme jako ztráty dodatečné [3].



Obr. 2 – Hysterezní smyčka, B – magnetická indukce, H – Intenzita magnetického pole (převzato z [10])



Obr. 3 – Vířivé proudy, zobrazeny červeně (převzato z [11])

2.1.3 Ztráty ve vinutí

ΔP_j je závislé na odporu vinutí R a protékajícím proudem, který je v této rovnici dominantní (I^2).

$$\Delta P_j = m \cdot R \cdot I^2 \quad (4)$$

Kde konstanta m představuje počet fází. Důležité je též zmínit, že odpor je závislý na teplotě. S přibývajícím teplotou roste jeho hodnota.

V případě točivých elektrických strojů tvoří tyto ztráty 35-60% celkových ztrát (u transformátorů to může být až 78%) [4].

2.1.4 Ztráty dodatečné

ΔP_d mezi které počítáme ztráty vyššími harmonickými, vířivými proudy v hmotách blízko vinutí, povrchové ztráty a pulsní ztráty.

Celkové ztráty jsou pak dány součtem všech ztrát stroje:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_j + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \quad (5)$$

2.2 Ztráty v měniči

Ztráty v měniči můžeme rozdělit na dvě kategorie. První a větší ztráty nastávají při vypínání a zapínání výkonového tranzistoru. Druhé ztráty jsou způsobeny ztrátovým výkonem na odporu (tepelné ztráty)

2.2.1 Přepínací ztráty

AC/AC měnič funguje na principu rychlého zapnutí a vypnutí výkonového tranzistoru, tzn. vytváří pulzně šířkovou modulaci. Takové ztráty nazýváme přepínací ztráty.

Jejich velikost závisí na polovodičové součástce, konkrétně na jejím kolektorovém proudu $i_C(t)$ a kolektorovém napětí $u_{CE}(t)$. Při takovém vypnutí tranzistoru klesá proud $i_C(t)$ na nulu a napětí $u_{CE}(t)$ exponenciálně stoupá na maximální hodnotu. Při zapnutí se tento jev děje též, ovšem obráceně.

Velikost okamžitého ztrátového výkonu přeměňovaného v čipu na teplo je:

$$p_C(t) = u_{CE}(t) \cdot i_C(t) \quad (6)$$

Celková ztrátová energie jednoho vypnutí:

$$W_{off} = \int_0^{I_{off}} u_{CE}(t) \cdot i_C(t) dt \quad (7)$$

Celková ztrátová energie jednoho zapnutí:

$$W_{on} = \int_0^{I_{on}} u_{CE}(t) \cdot i_C(t) dt \quad (8)$$

Přepíná-li tranzistor s frekvencí f , činný ztrátový přepínací výkon P_p uplatní obě energie f -krát za sekundu. Jeho celková velikost bude:

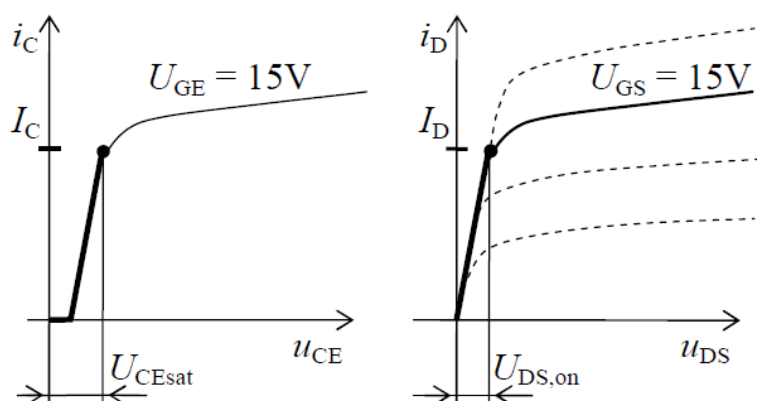
$$P_p = f(W_{off} + W_{on}) \quad (9)$$

V praxi se ovšem z důvodu integrace tyto vzorce nepoužívají. Pro praktický návrh použijeme vzorec, který nám určí přibližnou hodnotu přepínacích ztrát:

$$P_p \approx \frac{1}{2} \cdot f \cdot U_d \cdot I_z \cdot (t_{on} + t_{off}) \quad (10)$$

kde hodnota U_d představuje námi spínané napětí, I_d spínaný proud a hodnoty t_{on} a t_{off} nám představují dobu přechodového jevu zapnutí a vypnutí tranzistoru. Existují metody, kterými se dá snížit hodnota přepínacích ztrát (např. snížení spínacího kmitočtu, či použití rychlejšího tranzistoru) [5].

Nutno zmínit, že se pro vysokofrekvenční spínání používá dvou typů tranzistorů. Tranzistory MOS-FET, které jsou sice mnohem rychlejší než tranzistory IGBT, ale se zvětšujícím spínaným napětím U roste jejich odpor a při vyšších napětích (zejména nad 1000V) mají velké ztráty. Tranzistory IGBT se používají pro vysokonapětové spínání, neboť jejich voltampérová charakteristika má strmější profil (tedy menší ztráty při vyšším napětí), ale nedá se s ním spínat vyšší frekvencí, neboť jeho spínací napětí je ovlivněno saturací (viz. Obr. 4).



Obr. 4 – Rozdíl ve spínání tranzistoru IGBT (vlevo) a MOS-FET (vpravo). (Převzato a upraveno z [12])

2.2.2 Ztráty vedením

Pro výpočet ztrát na jednom tranzistoru IGBT, které jsou způsobeny vedením P_v můžeme využít vztahu:

$$P_v = U_{PT} \cdot I_{Cstř} + R_{dT} \cdot I_{Cef}^2 \quad (11)$$

kde I_{Cef} a $I_{Cstř}$ představují efektivní a střední hodnotu proudu procházející tranzistorem, U_{PT} je spínací napětí tranzistoru (offset) a R_{dT} je hodnota dynamického odporu tranzistoru. Hodnoty U_{PT} a R_{dT} jsou zjistitelné z katalogového listu daného tranzistoru [6].

Pro transistor MOS-FET se používá výpočet:

$$P_v = R_v \cdot I_{ef}^2 \quad (12)$$

Kde R_v je odpor vodivého kanálu a I_{ef} je efektivní hodnota střídavého proudu, který prochází tranzistorem.

Celkové ztráty na měniči P_c se tedy spočítají:

$$P_c = P_v + P_p \quad (13)$$

2.3 Ztráty v kuličkovém šroubu

Kuličkový šroub je jednoduchý mechanický aktuátor, jenž převádí rotační pohyb na translační. Tento převod pohybu je zapříčiněn kuličkami, které se pohybují ve vodících drážkách, a tedy fungují jako ložisko. Ovšem aby byl pohyb převeden na translaci, je potřeba, aby drážky byly vychýleny od osy hřídele o určitý úhel (úhel záběru). Kvůli tomu ovšem vznikají ztráty třením, které jsou závislé na mnoha aspektech.

Ztráty zde budeme interpretovat jako moment potřebný k rozpohybování kuličkového šroubu [7].

Výpočet momentu:

$$M = \frac{F_T \cdot l_d}{2\pi \cdot \eta_1} \quad (14)$$

Kde:

F_T představuje třecí sílu mezi pohybovaným objektem a povrchem, po kterém se pohybuje. Výpočet této síly je:

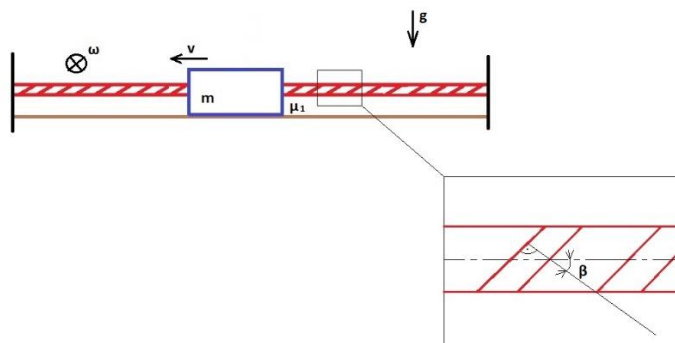
$$F_T = \mu_1 \cdot m \cdot g \quad (15)$$

V této elementární rovnici vystupuje m jako hmotnost pohybujícího se objektu, g je tíhové zrychlení a μ_1 je koeficient tření mezi povrchem pohybujícího se objektu a povrchem, po kterém se objekt pohybuje. Rovnice (15) platí pouze, je-li těleso ve vodorovné poloze. Jestliže je v jiné poloze, bereme v potaz pouze tu složku $m \cdot g$, která je rovnoběžná s normálou povrchu, po kterém se těleso pohybuje. l_d je délka vodící drážky, nezbytná pro otočení šroubu o 360° . η_1 je účinnost vodícího šroubu, jehož výpočet je dán touto rovnicí:

$$\eta_1 = \frac{\tan(\beta)}{\tan(\beta + \arctan(\mu_2))} \quad (16)$$

Zde má majoritní vliv úhel záběru β (úhel mezi osou vodícího šroubu a normálou vodící drážky). Koeficient tření μ_2 zde představuje tření mezi materiálem vodícího šroubu a materiálem, ze kterého jsou vyrobeny kuličky, které se odvalují ve vodícím žlábků (předpokládáme zde bodový dotyk).

Obecně je kuličkový šroub daleko efektivnější než standardní šroubový převod a průměrná účinnost takových kuličkových šroubů se pohybuje okolo 90 %. Produkují tedy velmi málo tepelné energie. Ovšem jsou náchylné na prašné prostředí, které může ovlivnit koeficient tření – zvrásnění povrchu, a tedy zvětší třecí sílu a sníží účinnost celé soustavy. Úhel záběru je u účinnosti také velmi zásadní. Platí, že zvětšením úhlu sice snížíme celkový moment potřebný k rozpohybování, ale snížíme tím i přesnost posuvu, kterého chceme dosáhnout [8].



Obr. 5 – Zobrazení použitých veličin a funkce kuličkového šroubu

3 ÚČINNOSTNÍ MAPY POHONU SE SYNCHRONNÍM MOTOREM

3.1 Požadavky na motor

Pro měření účinnosti je potřeba postupovat podle normy, aby všechny měřené účinnosti byly srovnatelné. Měřené motory tedy musí splňovat určité požadavky uvedené v normě [13].

3.2 Zkušební metody

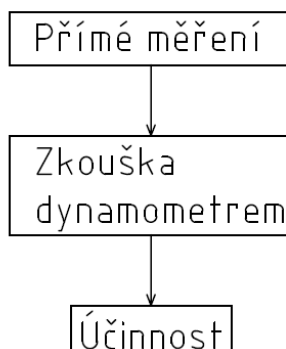
Existuje více metod pro měření účinnosti pohonu se synchronním strojem s elektrickým buzením. Níže budou uvedeny 3 hlavní metody určování účinnosti. Ostatní metody jsou méně časté a jsou uvedeny v normě [13].

3.2.1 Metoda přímého měření příkonu a výkonu

Jedná se o metodu, jejíž příkon a výkon se měří z mechanického výkonu P_{mech} (měřením krouticího momentu a otáček) a z elektrického příkonu na stator motoru P_{el} . Pro motorický režim $P_1 = P_{el}$ a $P_2 = P_{mech}$. V generátorickém režimu je pro P_{mech} a P_{el} výkonnostní tok obráceně. Určení účinnosti je:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}} \quad (17)$$

Kde P_{1E} jsou ztráty v budícím obvodu.

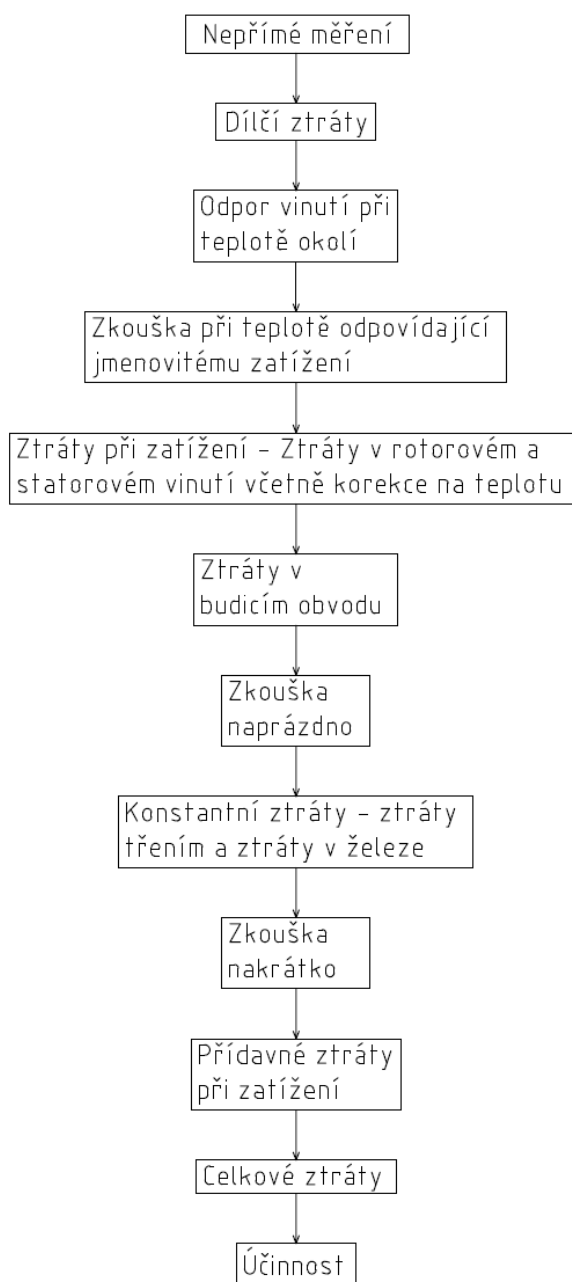


Obr. 6 – Přímé měření příkonu a výkonu (převzato a upraveno z [13])

Nutno dodat, že P_{1E} můžeme zanedbat tam, kde motor není buzen elektricky.

3.2.2 Součet ztrát se zkouškou při plném zatížení a zkouškou na krátko

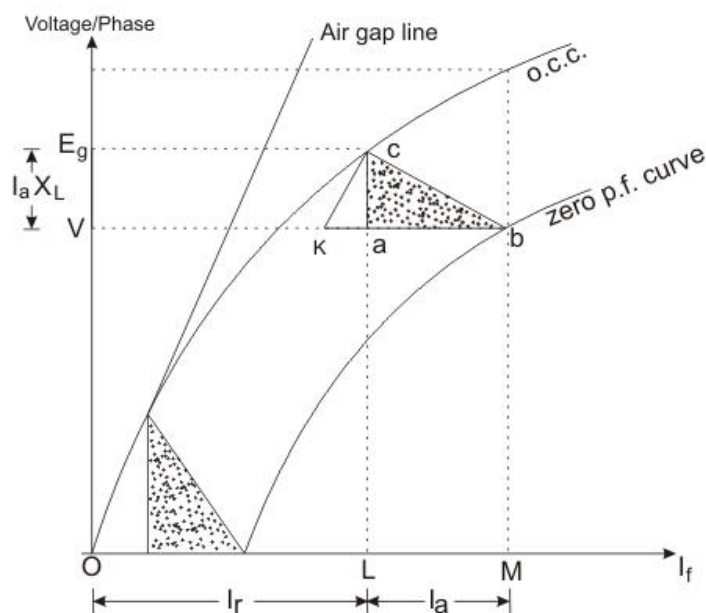
Při této zkoušce musí stroj pracovat ve stavu tepelné rovnováhy (rychlost změny teploty nesmí být větší jako 1 K/hod). Při jmenovitém zatížení a při ustálené teplotě se změří potřebné hodnoty pro spočítání ztrát v rotorovém a statorovém vinutí. Poté se provede zkouška na prázdko a změří se hodnoty potřebné pro spočítání ztrát třením a ztrát v železe. Poté se provede zkouška na krátko a spočítají se přídatné ztráty. Nakonec se všechny ztráty sečtou a spočítá se účinnost pohonu. Postup viz. Obr. 7. Tento postup je obecný a pro náš konkrétní motor s permanentními magnety jsou ztráty v budicím obvodu zanedbány.



Obr. 7 – Součet dílčích ztrát se zkouškou při teplotě odpovídající jmenovitému zatížení a zkouškou nakrátko (převzato a upraveno z [13])

3.2.3 Součet dílčích ztrát bez zkoušky při plném zatížení

Zkušební postup je v principu podobný jako postup v metodě součtu dílčích ztrát se zkouškou při teplotě odpovídající jmenovitému zatížení a zkouškou nakrátko. Jediným rozdílem je, že hodnoty ze zkoušky při teplotě odpovídající jmenovitému zatížení jsou nahrazeny. Budicí proud se určí pomocí diagramu ASA, švédského diagramu, nebo Potierova diagramu. Tato zkušební metoda je vhodná pro stroje s jmenovitým výkonem nad 2MW.



Obr. 8 – Příklad Potierova diagramu pro synchronní motor (převzato z [14])

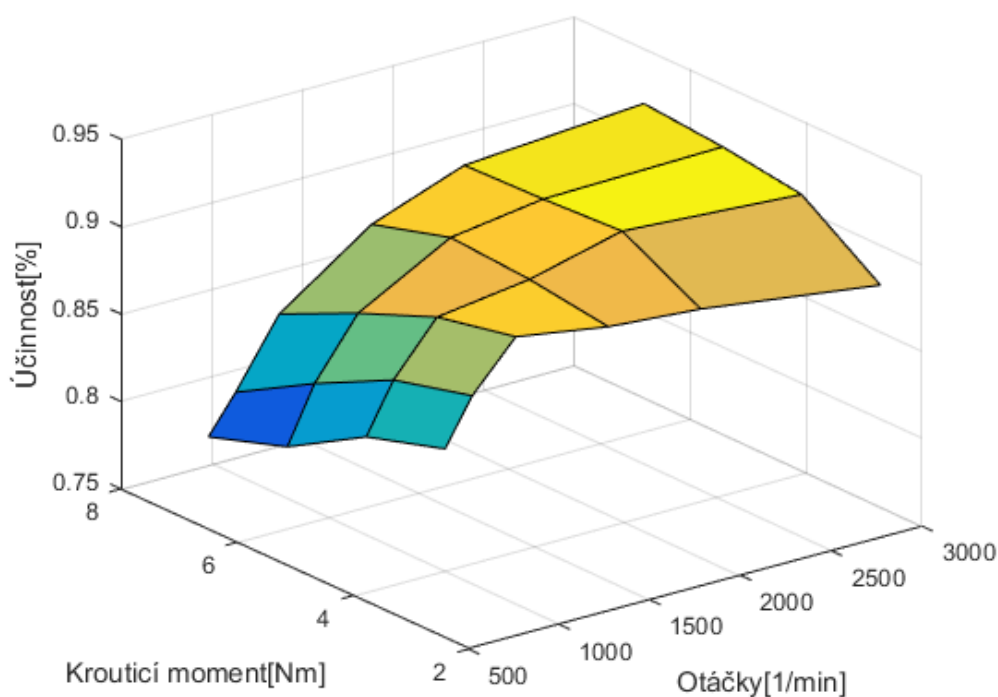
4 INTERPOLAČNÍ METODY

Interpolace je numerický obor matematiky, zabývající se odhadem funkční hodnoty neznámé funkce pomocí známých funkčních hodnot.

Interpolace se často používá v počítačové grafice, kdy je potřeba vykreslit plochu [9]. Cílem této práce je použít tyto metody pro hodnoty získané experimentálním měřením. K vytvoření skriptů s různými interpolačními metodami byl v této práci zvolen program MATLAB. Ke každé metodě je přiložen Obr., který interpretuje danou interpolační metodu. Interpolovat se budou vypočítané hodnoty účinnosti (18) na motoru (hodnoty ztrát udané výrobcem) viz. *Obr. 9*.

$$\eta = \frac{M \cdot \omega}{M \cdot \omega + P_z} [\%] \quad (18)$$

Kde: P_z je ztrátový výkon udaný výrobcem.



Obr. 9 – Ztráty na motoru udávané výrobcem

Použité interpolační metody:

4.1 Metoda nejbližší soused

Tato metoda je velmi jednoduchá viz. *Obr. 10*. Funguje na principu přiřazení neznámé hodnotě tutéž hodnotu, která je nejbližší známá. Použitá interpolace je pak velmi nepřesná, ale není náročná na výpočet (19).

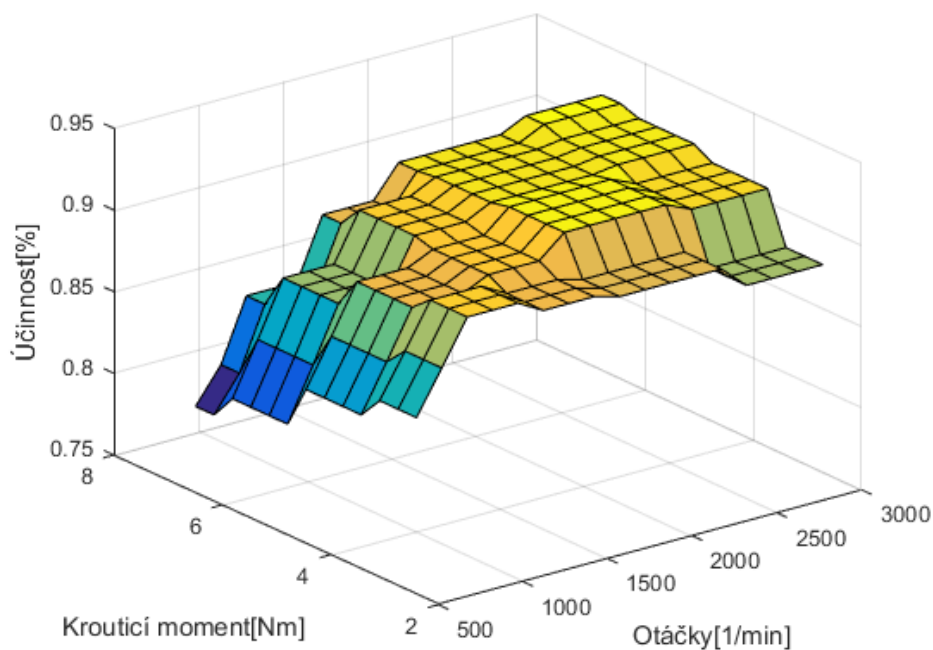
Matematicky vyjádřeno:

$$Z(x, y) = Z(\min(d(x_i, y_i)))$$

$$d(x_i, y_i) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$$
(19)

Kde:

$i \in N$, N je počet všech známých bodů, x_i, y_i jsou známé body a x, y je bod, pro který hledáme funkční hodnotu



Obr. 10 – Metoda nejbližší soused

4.2 Metoda bilineární

Metoda bilineární je relativně jednoduchá. Funguje na principu vytvoření přímky mezi dvěma známými body a vložení neznámého bodu do rovnice. Tento proces se provede nejdříve pro spojení x-ových bodů pro menší y-hodnotu, poté pro spojení x-ových bodů pro větší y-hodnotu. Do rovnic vytvořených přímek vložíme x-ovou hodnotu neznámého bodu. Tím získáme dva body, které opět spojíme přímkou a po vložení y-hodnoty do rovnice získáme odhadovanou hodnotu neznámého bodu. Nevýhodou této metody je závislost na mřížkovém uspořádání známých hodnot.

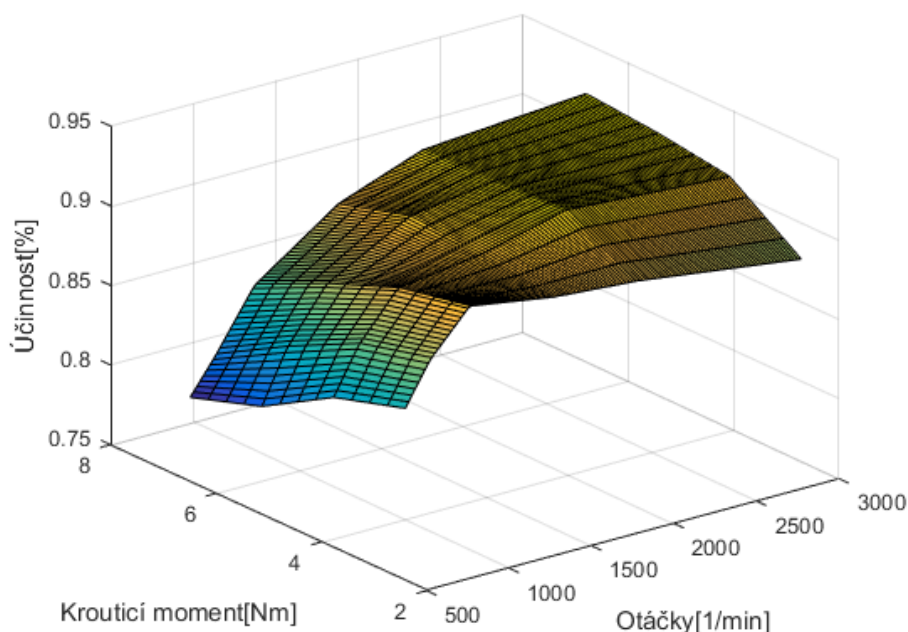
Matematicky vyjádřeno:

$$Z(x, y) = z_2 + \frac{y - y_m}{u_y(1)} \cdot u_y(2) \quad (20)$$

$$u_y = [y_n - y_m, z_1 - z_2] \quad (21)$$

Kde:

y_m je nejbližší známá y-hodnota, která je větší než y-hodnota neznámého bodu, y_n je nejbližší známá y-hodnota, která je menší než y-hodnota neznámého bodu. u_y je směrový vektor (21) pro interpolaci v y-směru. z_1 a z_2 jsou z-hodnoty dvou interpolací v x-směru. x, y je bod, pro který hledáme funkční hodnotu.



Obr. 11 – Metoda bilineární

4.3 Vážené inverzní vzdálenosti

Tato metoda (konkrétně Shepardova) se využívá pro rozptýlenou sadu bodů. Její výhodou je především jednoduchost a je nenáročná na výpočet. Její hladkost je možné upravit dle potřeby. Je potřeba znát vzdálenosti všech bodů od bodu s neznámou funkční hodnotou. Ty jsou potřebné pro výpočet váhy (tzv. míry blízkosti) podle vzorce:

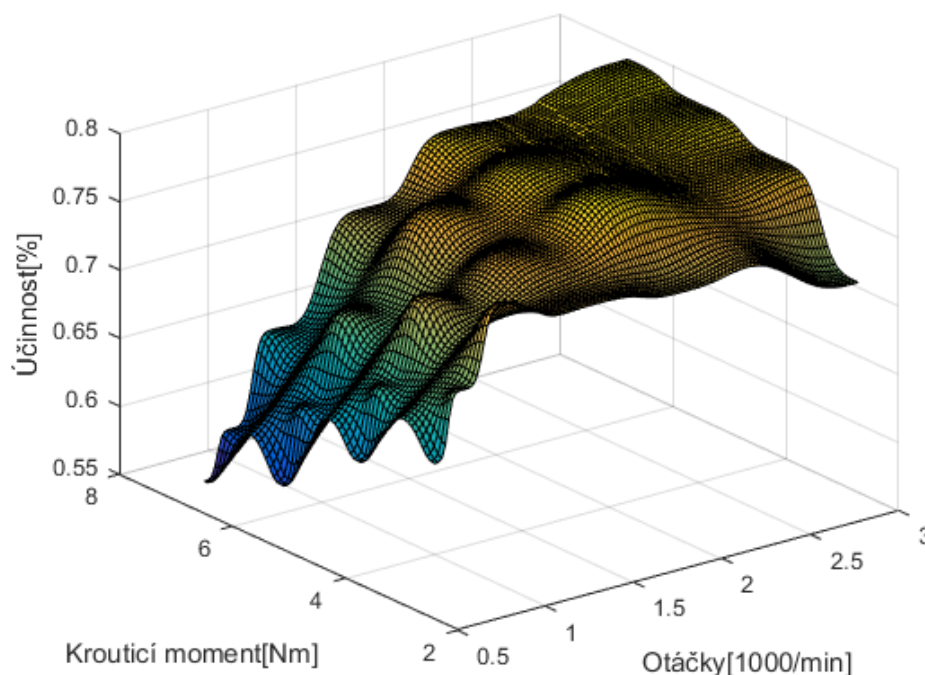
$$w_j = \frac{1}{d_j^p(x, y)} \quad (22)$$

kde $d_j(x, y)$ je vzdálenost známého bodu od neznámého, p je ladicí parametr a N je počet všech bodů.

Hodnota v neznámém bodě se určí pomocí vzorce:

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^N \frac{w_i(x, y) \cdot Z_i}{\sum_{j=1}^N w_j(x, y)} \quad (23)$$

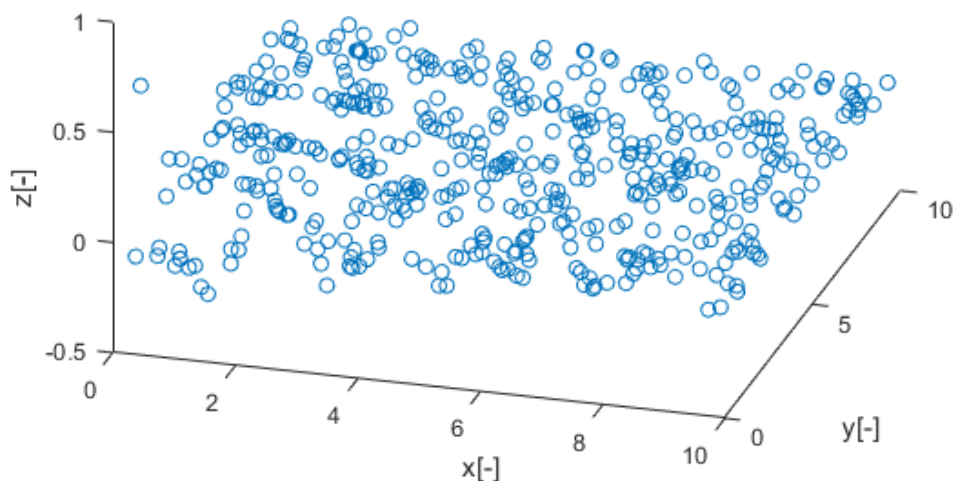
Nevýhoda této metody je nepřesnost pro systémy s málo známými body a také závislost na vzdálenosti. Z toho plyne, že hodnoty na osách musí být řádově stejné. Dále byl skript upraven o možnost počítání bodů pouze uvnitř poloměru R (vyhodnocuje uživatel). Tudíž pak výsledná hodnota není ovlivněna všemi body, ale pouze některými. Tím se zamezuje nežádoucím skokům v průběhu funkce.



Obr. 12 – Metoda vážené inverzní vzdálenosti

Na Obr. 12 lze vidět, že pro systém s 24 známými body je tato metoda méně přesná. Avšak velká výhoda této metody je, že je schopna poměrně přesně reprodukovat původní funkci na základě náhodně rozvržených funkčních hodnot v prostoru. Uvedený příklad je pro funkci (24). Do funkce jsou vloženy náhodné hodnoty x a y (viz. Obr. 13).

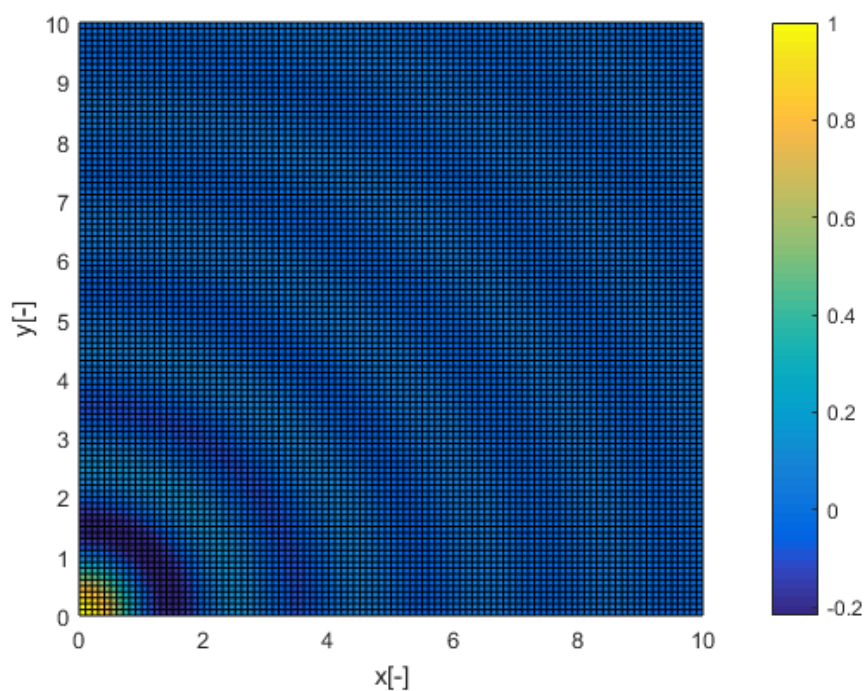
$$z(x,y) = \text{sinc}(\sqrt{x^2 + y^2}) \quad (24)$$



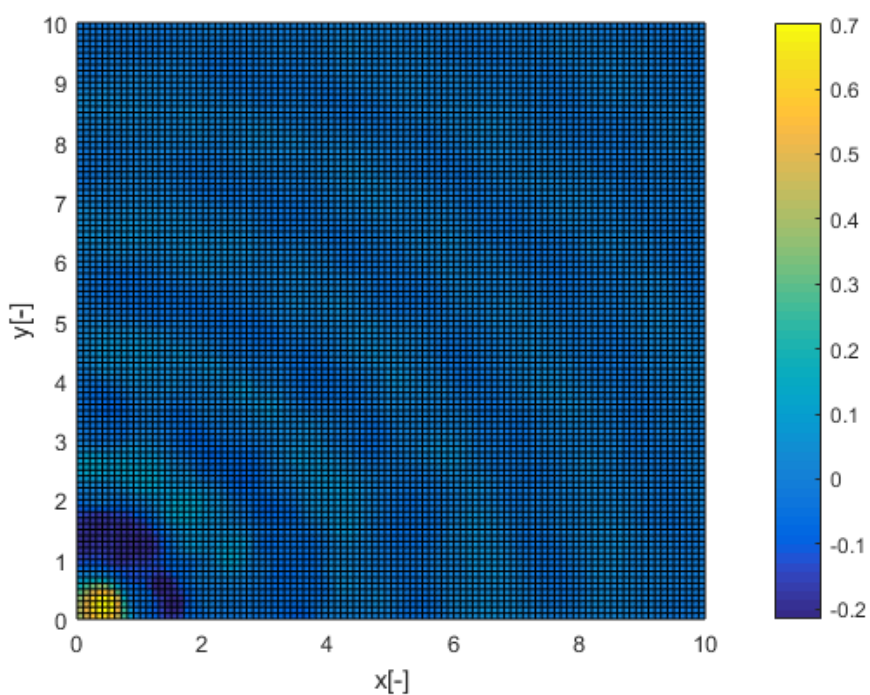
Obr. 13 – Náhodně vygenerované body podle funkce (24)

(počet bodů - 499)

Z bodů na Obr. 13 – Náhodně vygenerované body podle funkce (24) jsme schopni pomocí této interpolační metody reprodukovat (viz. Obr. 15) původní vzhled této funkce (viz. Obr. 14).

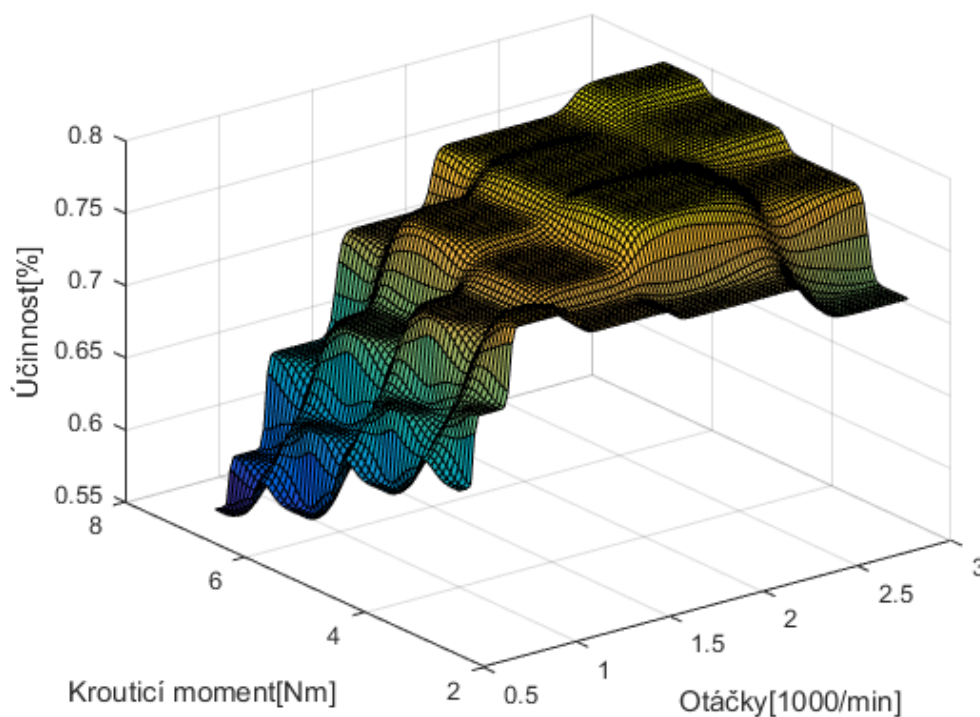


Obr. 14 – Vygenerované funkční hodnoty, interpretující originální vzhled funkce (počet bodů - 249001)



Obr. 15 – Interpolace na základě známých hodnot z Obr. 13 (tzn. reprodukce vzhledu funkce na základě pouze známých 0,2% dat)

Pro porovnání, jak funguje ladicí konstanta (exponent) p . Na *Obr. 12* je $p = 3$ a na *Obr. 16* je konstanta $p = 5$. Z obrázků plyne, že čím větší konstanta p je, tím větší je vliv vzdálenosti blízkých bodů. Tzn. pro $p \rightarrow \infty$ je tato metoda shodná s metodou nejbližšího souseda.

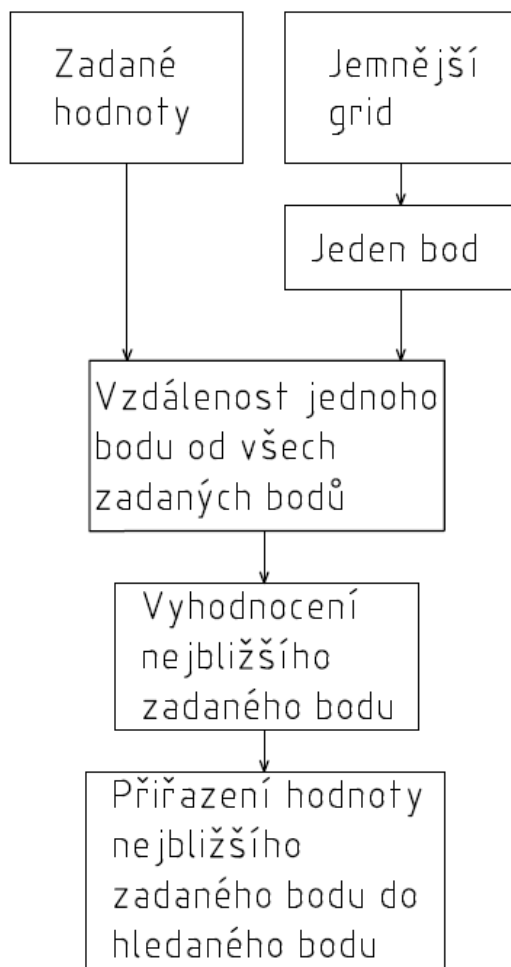


Obr. 16 – Tvar interpolované plochy při $p = 5$

5 VYTVÁŘENÍ A IMPLEMENTACE PROGRAMŮ

5.1 Vytváření interpolačních programů

Jako první byl zvolen program pro interpolaci pomocí metody nejbližšího souseda, z důvodu jeho jednoduchosti a univerzálnosti. Podrobnou funkci programu reprezentuje *Obr. 17*.

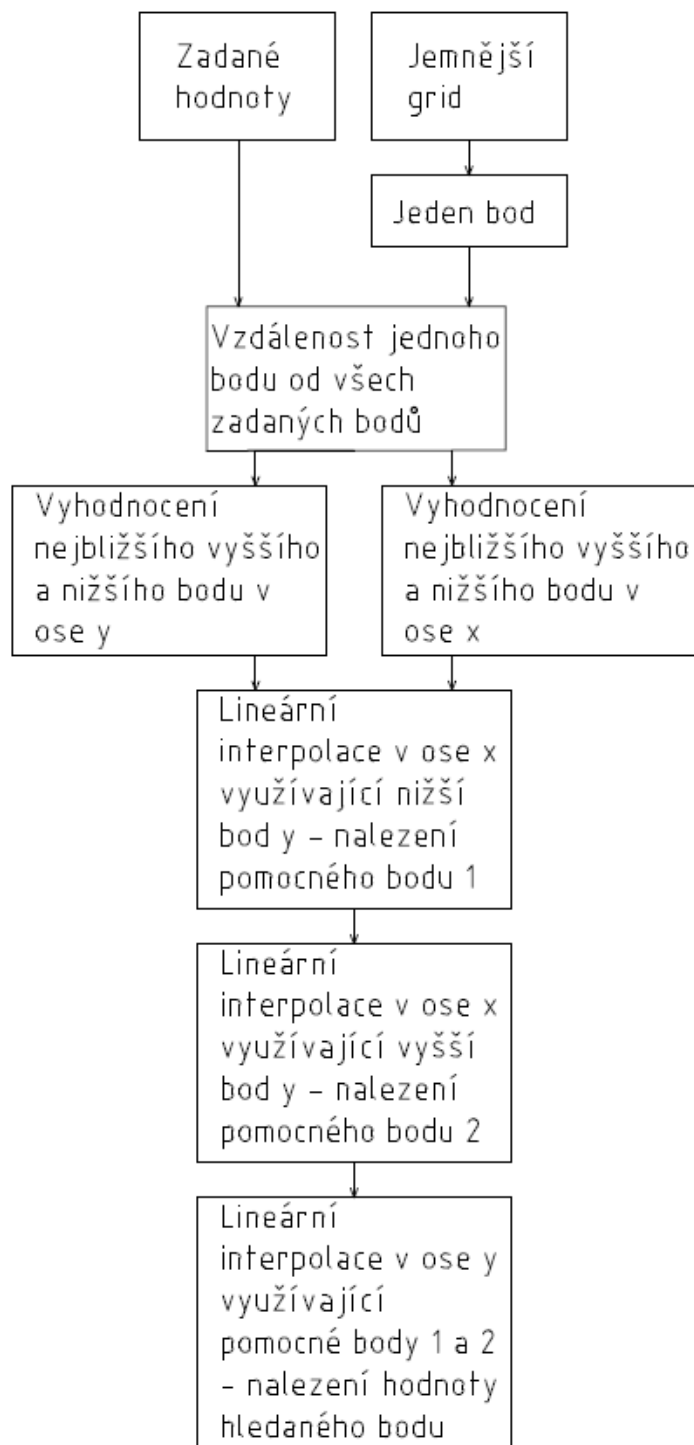


Obr. 17 – Princip činnosti programu interpolující pomocí metody nejbližšího souseda

Další byl zvolen program pro bilineární interpolaci. Jeho funkce je popsána v *Obr. 18*. Bilineární interpolace z principu potřebuje zadané (známé) hodnoty mřížkového charakteru. To byla při programování zásadní informace, kdy byly proměnné matice (v předchozí a následující metodě jsou pouze vektory). Dále je program ošetřen pro možnost, že se hledaný bod ztotožňuje s bodem reálným (tedy se přiřadí jeho hodnota).

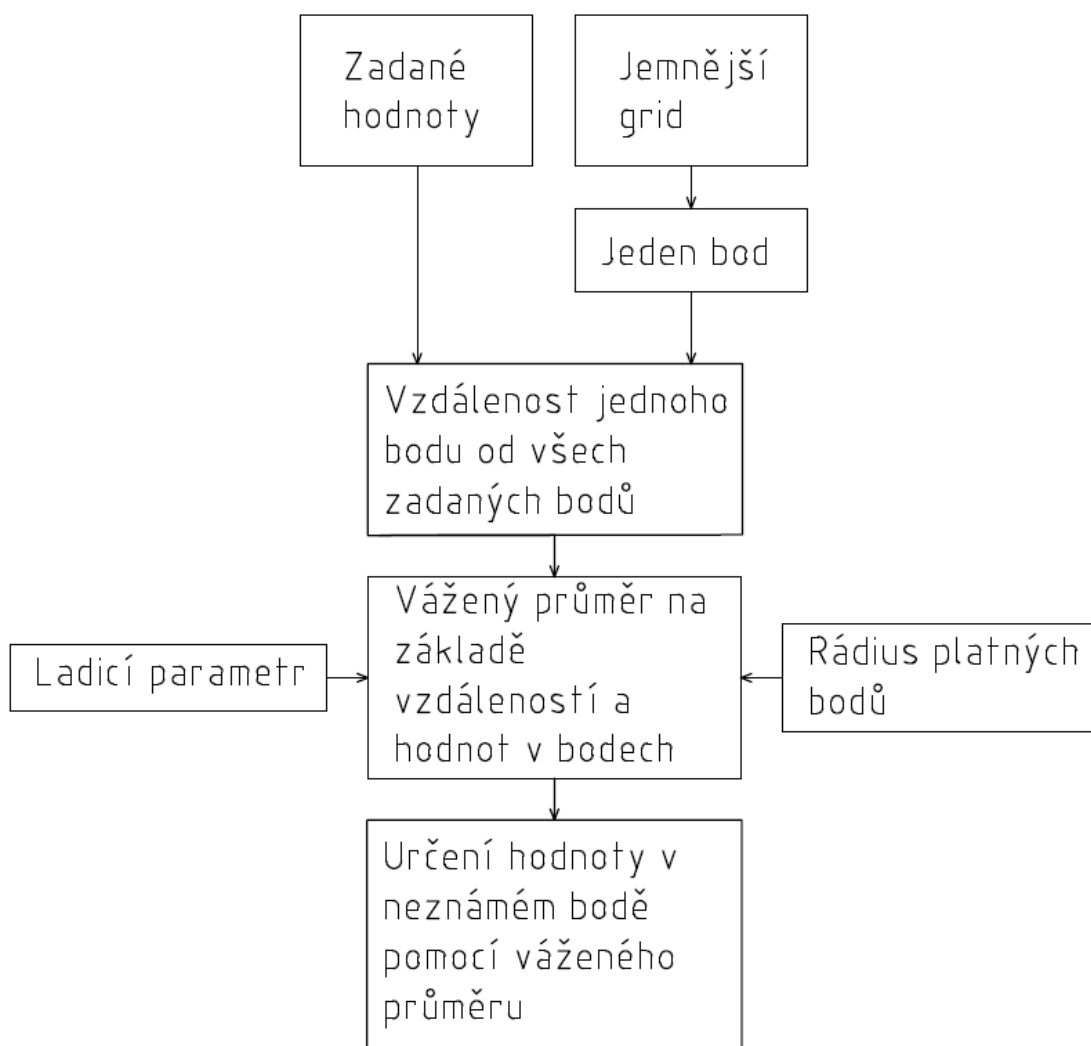
V Obr. 18 je výraz lineární interpolace. To je spojení dvou bodů přímkou a funkční hodnota hledaného bodu leží na této konkrétní přímce mezi dvěma známými body.

Metodu bilineární nelze použít na body náhodně rozprostřené v prostoru a to z důvodu, že by hledaný bod nemusel ležet mezi body, které jsou mu nejbližší. Interpolace by tedy nešla provést.



Obr. 18 – Princip funkce programu interpolující pomocí bilineární metody

Třetí vytvořený program byl na interpolaci pomocí inverzních vzdáleností. Tato metoda byla mnou zvolena jako nejlepší pro tuto práci, protože pracuje na principu statistického váženého průměru. Při psaní bylo zjištěno, že nevýhodou tohoto programu jsou nerovnoměrné hodnoty na osách (neboť metoda počítá hodnotu v bodě na základě vzdálenosti). To bylo ošetřeno tím, že hodnoty na obou osách jsou přepočteny na podobné hodnoty v rozmezí 0 až 1. Taktéž byla přidána možnost, kdy se váhy bodů nepočítají ze všech, ale pouze z těch bodů, které leží uvnitř zadaného rádiusu. Princip činnosti je popsán na Obr. 19.

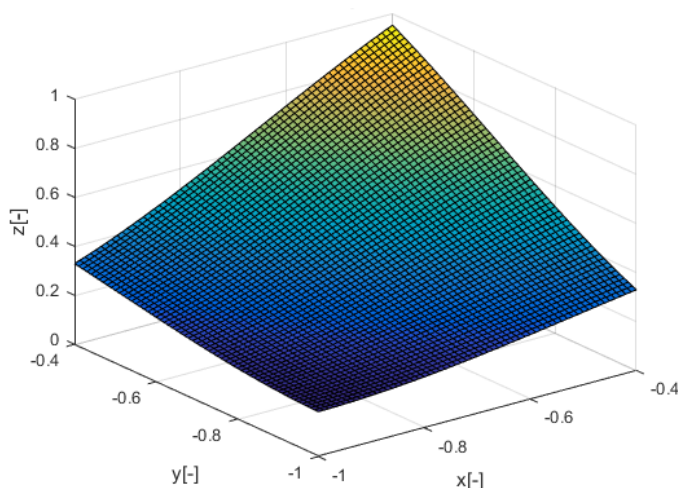


Obr. 19 – Princip činnosti programu na interpolaci pomocí inverzních vzdáleností

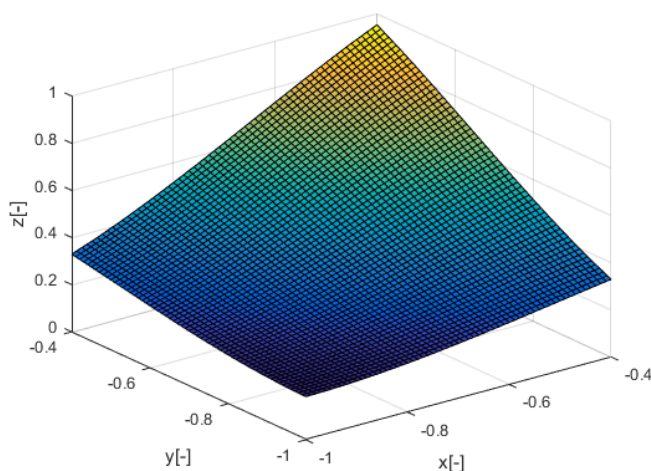
5.2 Porovnání interpolačních funkcí

Pro srovnání funkcí byl vytvořen skript, který pomocí části matematické funkce (24) nahrazoval tvarem účinnostní mapu pohonu. Následně byla tato plocha interpolována každou z předchozích interpolačních metod.

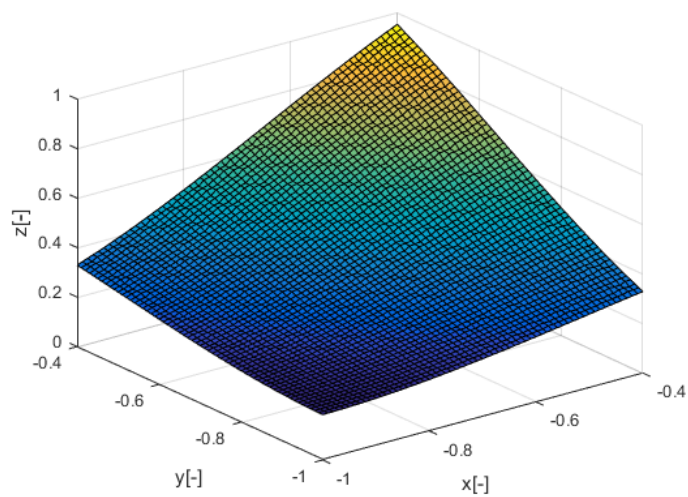
Hodnoty v interpolovaných bodech byly srovnány s hodnotami funkce (24) v těchto bodech. Následně byla změřena odchylka interpolovaných hodnot od skutečných hodnot. Celkové porovnání bylo vyvozeno z maximální odchylky od skutečné hodnoty.



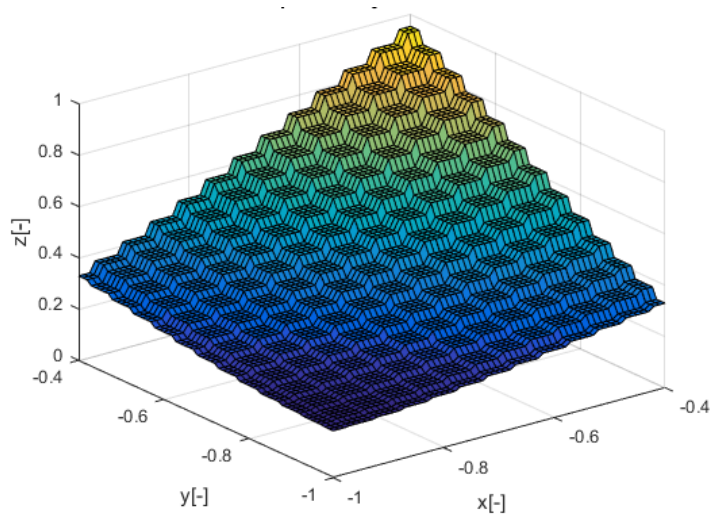
Obr. 20 – Graf skutečných hodnot



Obr. 21 – Interpolace bilineární



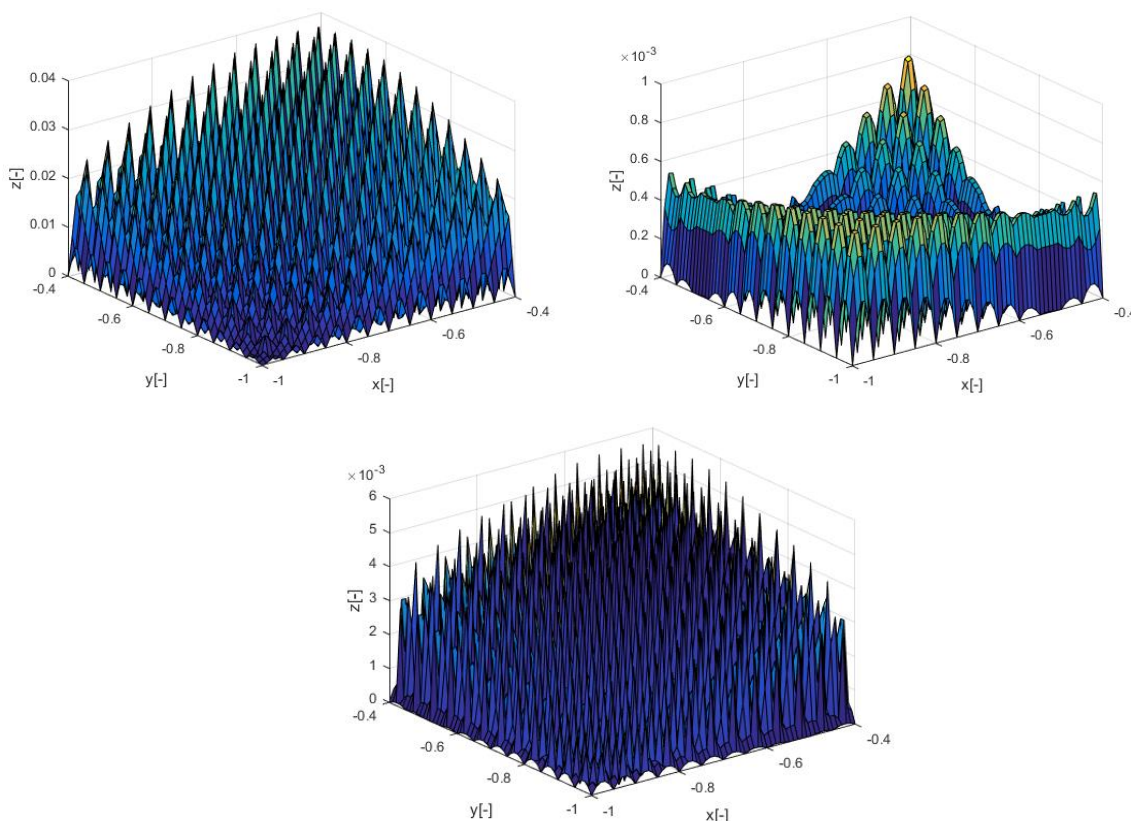
Obr. 22 – Interpolace IDW



Obr. 23 – Interpolace nejbližší soused

5.2.1 Chybovosti jednotlivých interpolačních metod

Obr. 24 reprezentuje rozdíly mezi skutečnými a interpolovanými hodnotami. Z obrázku lze vidět řádově rozdílná chybovost jednotlivých metod.



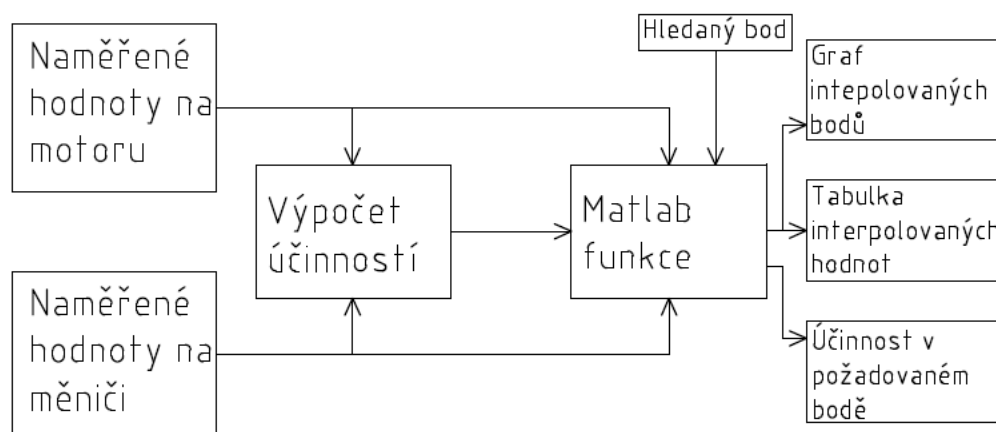
Obr. 24 – Rozdíly mezi skutečnými a interpolovanými hodnotami. Vlevo nahoře – metoda nejbližšího souseda. Vpravo nahoře – metoda bilineární. Dole – metoda inverzních vzdáleností

Nejvíce přesná je metoda bilineární, která má v tomto případě největší odchylku $\sim 0,01\%$. Její nevýhoda je, že známé hodnoty nemohou být náhodně v prostoru, ale musí být mřížkového charakteru. Méně přesná je metoda inverzních vzdáleností, která má pro tento případ maximální odchylku $\sim 0,7\%$. Výhoda této metody je její schopnosti interpolovat data náhodně rozvržené v prostoru. Nejméně přesná je metoda nejbližšího souseda, která má v tomto případě maximální odchylku $\sim 4,8\%$. Tato metoda je však velmi jednoduchá a nenáročná na výpočet.

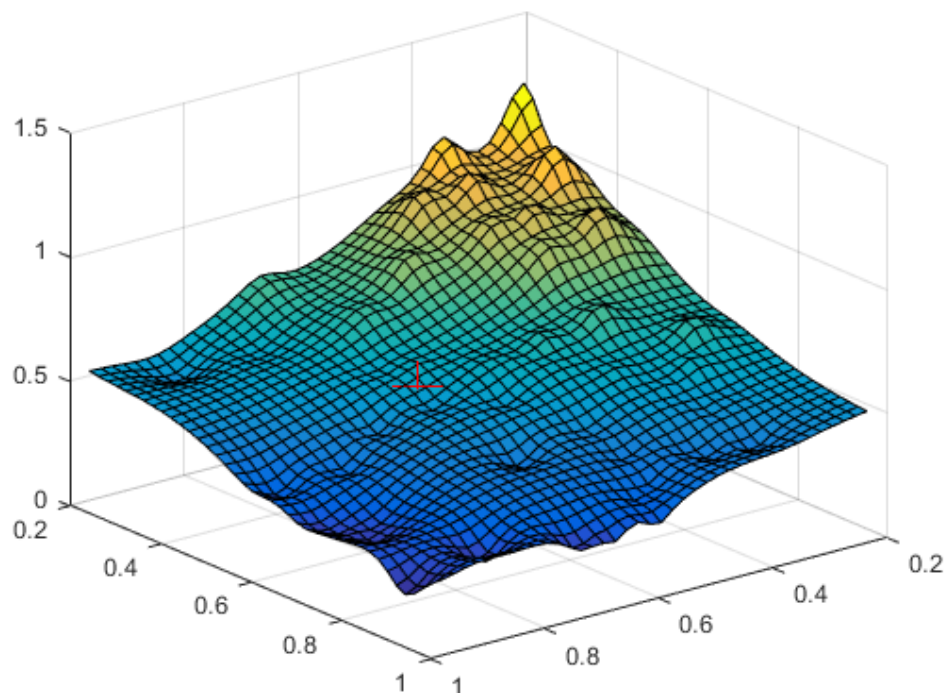
5.3 Implementace všech programů

Jako poslední byl vytvořen program, který si sám vybere interpolaci na základě vstupních dat. Pokud je počet známých bodů menší než 10 a jsou body náhodně rozvrženy v prostoru, zvolí se interpolace metodou nejbližšího souseda. Pokud je počet známých bodů 11 a více, zvolí se metoda inverzních vzdáleností. Pokud jsou vstupní data mřížkového charakteru, zvolí se metoda bilineární.

Uživatel následně zadá, v jakém bodě chce znát přibližnou účinnost motoru. Dále je určen jemný grid, pomocí kterého se vytvoří graf, který určuje přibližný vzhled mapy motoru. V grafu je zakreslena i hodnota v hledaném bodě (pomocí nitkového kříže) (viz. Obr. 26). Hodnota účinnosti je vypsána do konzole. Funkce tohoto programu je vysvětlena na Obr. 25.



Obr. 25 – Princip činnosti programu zahrnující všechny interpolace



Obr. 26 – Graf z programu volící si vlastní interpolaci. Použita funkce (24)

6 MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT

Při měření byl synchronní motor v kombinaci s kuličkovým šroubem použit jako lineární pohon jedné osy obráběcího stroje. Motor byl napájen z měniče, jehož hodnoty byly změřeny a převedeny do číslkové podoby. Pohon byl řízen pomocí g-code, což je jazyk, jež se používá pro obrábění pomocí numericky řízených obráběcích strojů.

g54
g00 x0
g01 x200 f500
g01 x0 f1000
g01 x200 f2500
g01 x0 f5000
g01 x500 f15000
g00 x0

Tab. 1 – Příkazy v jazyce g-code použité při měření

Vysvětlení použitého g-code v *Tab. 1*:

- g54 – nastavení pracovního offsetu
- g00 – rychlý posuv
- g01 – pohyb po přímce z počátečního bodu do koncového
- x200 – koncový bod (osa x)
- f500 – rychlost posuvu

Vysvětlení celého příkazu:

g01 x200 f500 – pohyb po přímce ze současné polohy do x200 rychlostí 500 mm/s

6.1 Napájení pomocí SINUMERIC 840D sl

SINUMERIC 840D sl je řídicí systém obsahující měniče Sinamics S120, jež jsou schopny napájet mimo jiné i synchronní motory. Viz. [15]. Jednou ze základních vlastností systému SINUMERIC 840D sl je měření několika uživatelem vybraných dat. Tato vlastnost byla použita pro naměření potřebných hodnot ke vypočítání účinnosti.

6.2 Naměřené hodnoty

Celkově bylo naměřeno několik hodnot – aktuální rychlost rotace rotoru motoru, okamžitý příkon a proud generující okamžitý krouticí moment.

Naměřené hodnoty byly ve velmi nepřehledném formátu (viz. *Tab. 2*)

F1	F10	F12	F2	F3	F5	F6	F7
0	-0,04285	0,000005	0	103,708	0	0	0,231934
	-0,04175						
0		-5E-06	0	103,708	0	0	0,238037
	-0,04285						
	-0,04065						
0	-0,04175	0,000005	0	103,708	0	0	0,250244
	-0,04285						
	-0,04175						
	-0,04285						
0		-5E-06	0,000977	103,708	-2E-06	0	0,22583
	-0,04395						

Tab. 2 – Část naměřených hodnot vygenerované systémem SINUMERIC

Naměřená data byla uložena v excelu, kde každý sloupec představoval jinou měřenou veličinu (viz. *Tab. 2*), která měla své ID totožné s ID v manuálu. Tento formát dat je nepoužitelný a neupravený.

n [1/min]	P_1 [W]	M [Nm]
1496,1	2378,3	1,51
1505,3	2422,8	1,54
1498,1	1850,4	1,18
1501,2	2545,0	1,62
1499,8	2039,4	1,30
1495,6	2333,9	1,49
1505,8	2422,8	1,54
1497,0	1839,3	1,17
1500,9	2506,1	1,60

Tab. 3 – Část upravených naměřených hodnot

Data z *Tab. 2* byla nepřehledná a bylo nutno je zpracovat do použitelné podoby (*Tab. 3*). K tomu byl potřeba manuál k systému SINUMERICS [16]. V tomto dokumentu je popsán každý měřený parametr.

Naměřené hodnoty byly následně převedeny do základních jednotek a z nich byl následně vypočítán výkon na hřídeli motoru jako:

$$P_2 = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \quad (25)$$

Když známe výkon a příkon motoru, bylo už možné spočítat účinnost:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (26)$$

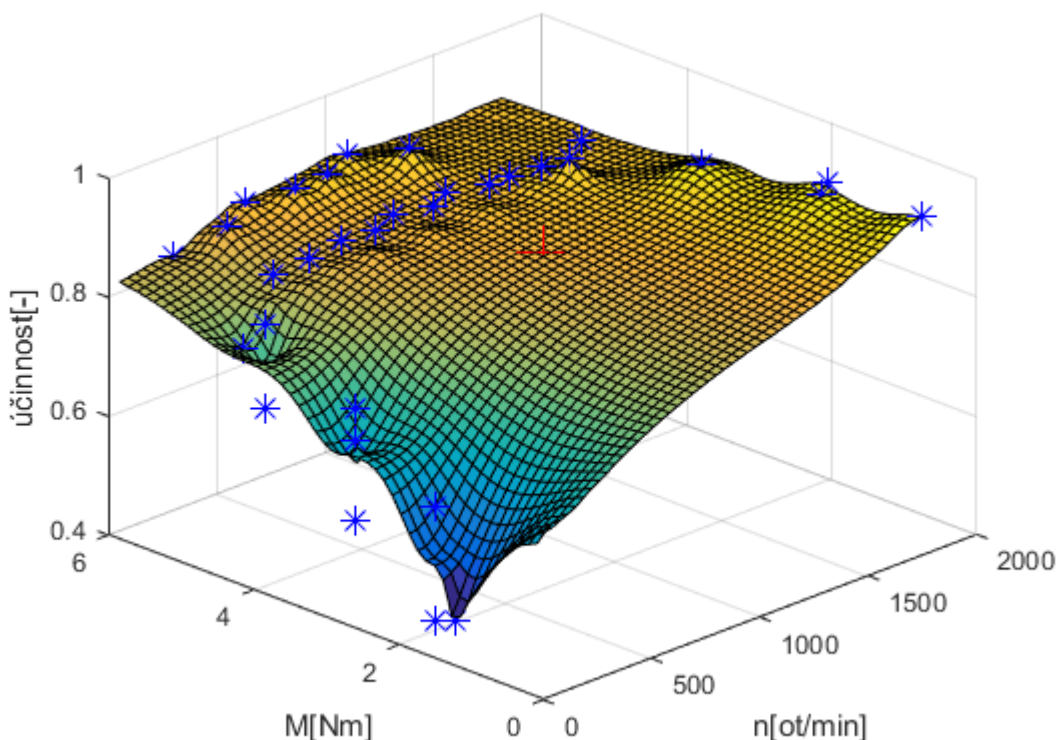
Nyní bylo možné zpracovat naměřená data do konečného formátu (viz. *Tab. 4*), která byla následně použita pro vykreslování grafů účinností.

n [1/min]	M [Nm]	η [%]
1417,266	3,864824	0,935217
1306,904	3,921427	0,935369
1188,193	4,015173	0,930168
1078,828	3,956802	0,933402
961,4356	4,211509	0,927058
847,2363	4,039936	0,924861
731,1914	4,252192	0,918752
616,4356	4,146064	0,912567

Tab. 4 – Část dat použitých pro vykreslení účinnostní mapy

6.3 Zpracování naměřených dat

Naměřená data bylo nutné porovnat s daty, které udává výrobce (*Obr. 11*). Program vyhodnotil nejvhodnější interpolační metodu (vážené inverzní vzdálenosti) a provedl interpolaci na základě naměřených dat (viz. *Obr. 27*)

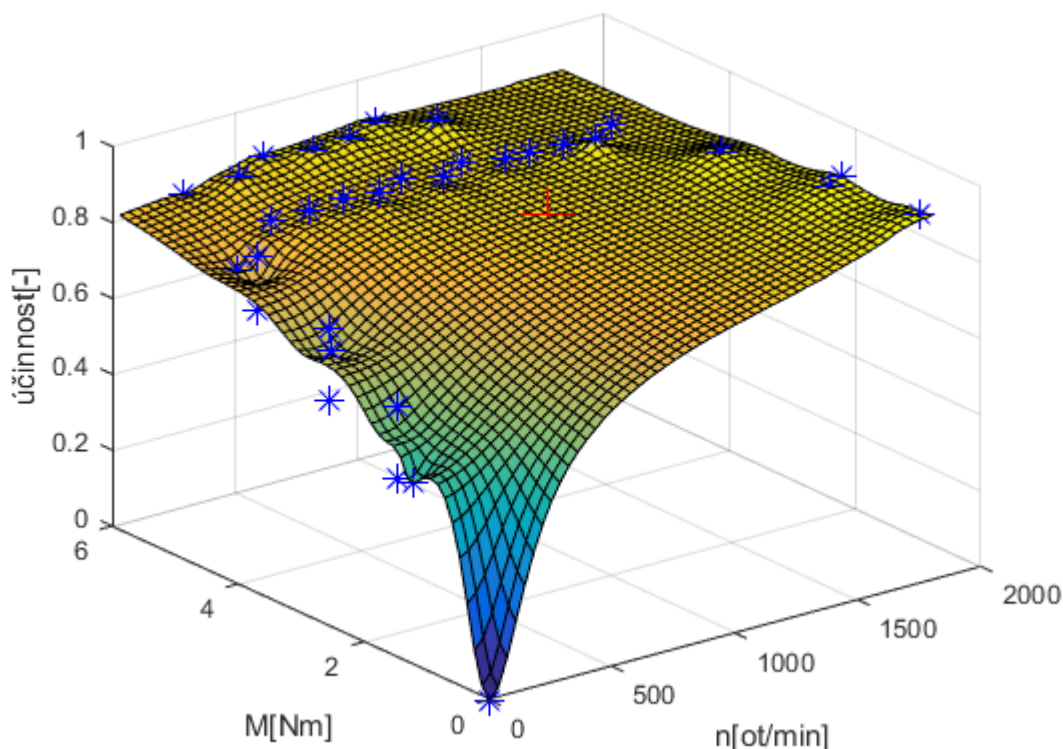


Obr. 27 – Interpolovaná plocha na základě naměřených dat

6.3.1 Úprava interpolované plochy

Na *Obr. 27* je vidět že interpolovaná plocha neodpovídá realitě. Například že v bodě s nulovým momentem a nulovými otáčkami je nenulová účinnost. Také lze vidět že plocha nemá hladký průběh, ale vyskytují se v ní nerealistické skoky v účinnosti.

Pro zlepšení přesnosti a přiblížení se realistickému průběhu závislosti účinnosti na momentu a otáčkách, bylo vhodné do zpracovávaných bodů přidat bod s nulovými otáčkami, momentem a nulovou účinností (viz. *Obr. 28*). Tento bod vychází z fyzikální podstaty.



Obr. 28 – Interpolovaná plocha na základě naměřených dat s přidáním bodem [0;0;0]

Lze vidět že průběh na *Obr. 28* je o poznání realističtější. V místech, kde byly naměřené body hustěji rozloženy stále byly skoky v účinnosti. Důvod těchto skoků je zapříčiněn podstatou interpolační metody. Neboli váha naměřených bodů je příliš velká, tj. vytváří se v ploše lokální maxima a minima, což je pro toto použití nežádoucí.

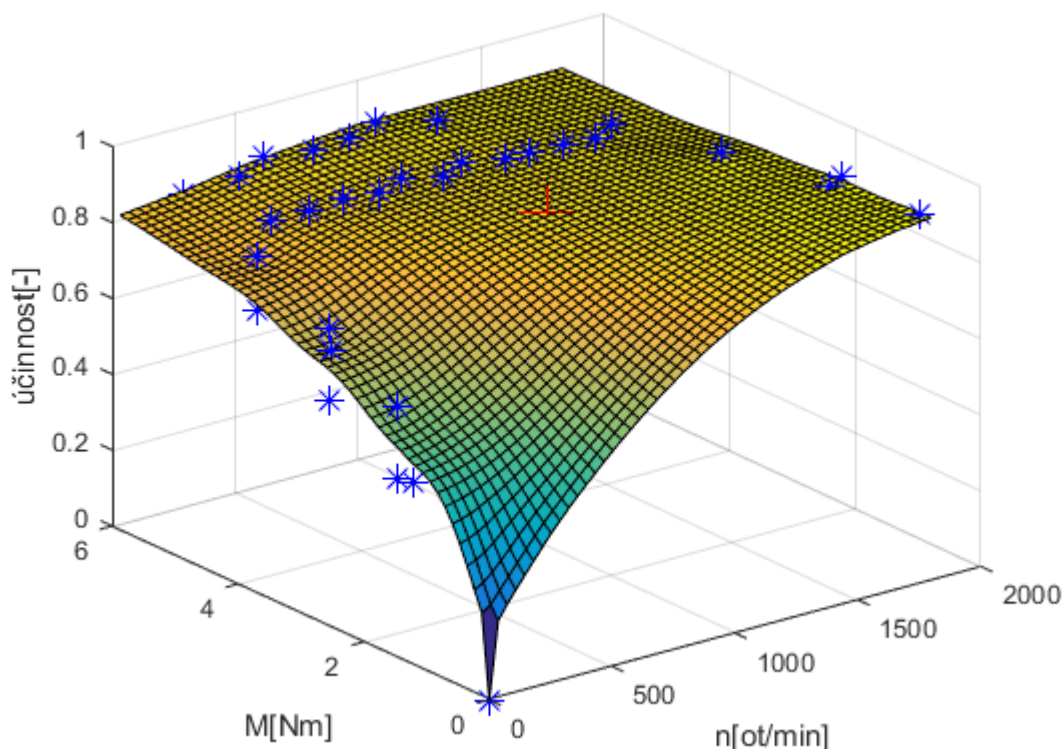
Řešením je slevení z nároků přesné interpolace a snížení váhy naměřených bodů [9]. Toho bylo docíleno rozšířením vzorce pro výpočet váhy bodu (27) o parametr $s > 0$.

$$\lambda_i = \frac{c}{(r_i + s)^p} \quad (27)$$

Parametr s je volitelný a má za následek, že jmenovatel pro výpočet váhy je větší, tudíž výsledná váha bude menší.

Abychom ale zajistili podstatu interpolace, je programem ošetřeno, že jestli některý z měřených bodů koinciduje s gridem hledaných hodnot, je tento bod vložen do plochy.

Výsledný graf závislosti účinnosti na otáčkách a momentu, který byl vytvořen na základě naměřených hodnot byl tedy znatelně shlazen (viz. *Obr. 29*).



Obr. 29 – Interpolovaná plocha na základě naměřených dat s přidáním bodem $[0;0;0]$ a s upraveným vzorcem pro výpočet vah bodů

Tato podoba (Obr. 29) je už dostačující a odpovídá realitě. Lokální maxima a minima byla vyhlazena.

6.4 Porovnání s daty udávaných výrobcem

Pro porovnání byly vybrány tři způsoby. Výsledkem každého porovnání je Tab. absolutních odchylek, průměrná odchylka a směrodatná odchylka.

6.4.1 Porovnání v bodech, ve kterých udává účinnost výrobce

První způsob je porovnání účinností, jež udává výrobce a účinností v téže bodech, ale v mapě, který byla vytvořena na základě naměřených dat (viz. Tab. 5, Tab. 6, Tab. 7).

účinnost [-]		M [Nm]			
		2,72	4,08	5,44	6,8
n [ot/min]	600	0,851	0,837	0,810	0,795
	750	0,877	0,865	0,842	0,817
	990	0,904	0,894	0,876	0,855
	1500	0,895	0,902	0,905	0,891
	2010	0,891	0,915	0,912	0,911
	3000	0,877	0,908	0,914	0,918

Tab. 5 – Účinnost udávaná výrobcem (vodorovně moment, svisle otáčky)

účinnost [-]		M [Nm]		
		2,72	4,08	5,44
n [ot/min]	600	0,822	0,862	0,875
	750	0,848	0,871	0,887
	990	0,874	0,883	0,897
	1500	0,917	0,900	0,898

Tab. 6 – Účinnost vycházející z mapy vytvořené z naměřených bodů (vodorovně moment, svisle otáčky)

Nebylo možné stanovit účinnosti ve všech bodech, ve kterých stanovuje účinnost výrobce, protože rozsah měření nedosahoval takových otáček a momentů.

účinnost [-]		M [Nm]		
		2,72	4,08	5,44
n [ot/min]	600	0,029	0,025	0,064
	750	0,029	0,006	0,044
	990	0,030	0,011	0,021
	1500	0,021	0,001	0,007

Tab. 7 – Absolutní odchylky v účinnosti (vodorovně moment, svisle otáčky)

Průměrná odchylka: $\bar{\eta} = 0,024105 [-]$

Směrodatná odchylka: $\sigma = 0,017686 [-]$

6.4.2 Porovnání v bodech, na kterých byla změřena účinnost

Druhý způsob porovnání spočíval v nalezení bodů, které byly naměřeny, v mapě vytvořené z hodnot, které udává výrobce (viz. Tab. 8)

n [ot/min]	M [Nm]	účinnost(měř.)	sizer(int.)	abs. odchylka
1647,6	2,73	0,945	0,894	0,051
1535,8	4,05	0,939	0,902	0,037
1417,3	3,86	0,935	0,900	0,036
1306,9	3,92	0,935	0,899	0,037
1188,2	4,02	0,930	0,897	0,033
1078,8	3,96	0,933	0,896	0,037
961,4	4,21	0,927	0,889	0,038
847,2	4,04	0,925	0,877	0,048
731,2	4,25	0,919	0,859	0,060

Tab. 8 – Data získaná porovnáním naměřených účinností v mapě vytvořené na základě dat udávaných výrobcem (sizer)

Průměrná odchylka: $\bar{\eta} = 0,04179 [-]$

Směrodatná odchylka: $\sigma = 0,00909 [-]$

6.4.3 Porovnání v bodech, které nebyly naměřeny ani je neudává výrobce

Tato metoda byla vybrána spíše pro porovnání kvality interpolace. Spočívá v nalezení náhodných bodů v obou účinnostních mapách (viz. Tab. 9) (vytvořené na základě naměřených dat a vytvořené na základě dat, udávaných výrobcem).

n [ot/min]	M [Nm]	účinnost(měř.)	účinnost(sizer)	abs. odchylka
1500	3	0,912	0,897	0,016
1000	4	0,884	0,890	0,006
1500	6	0,897	0,899	0,002
900	5	0,886	0,870	0,016

Tab. 9 – Data získaná při porovnání v bodech, které nebyly naměřeny, ani je přímo neudává výrobce

Průměrná odchylka: $\bar{\eta} = 0,01000 [-]$

Směrodatná odchylka: $\sigma = 0,00707 [-]$

7 ZÁVĚR

V diskrétním světě digitálních systémů nabývají interpolační algoritmy značného významu, neboť s jejich pomocí je možné přiblížit se spojitě sféře. Cílem této práce bylo vytvořit a implementovat interpolační algoritmy pro práci s účinnostními mapami synchronních strojů. Vytvořené účinnostní mapy se dále porovnaly s mapou, kterou udává výrobce.

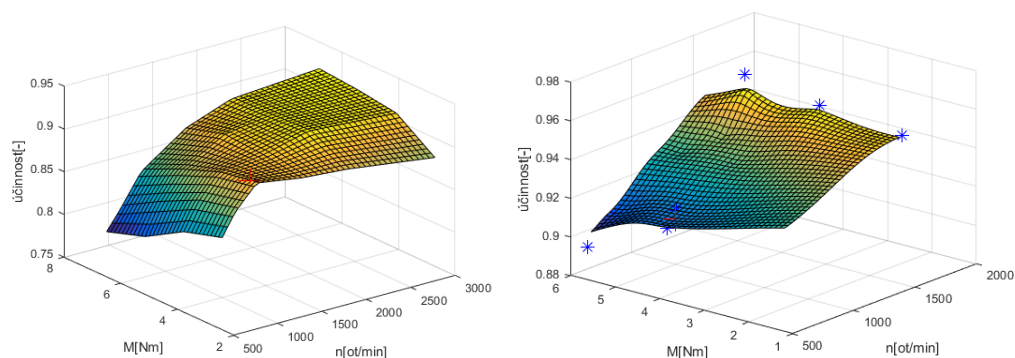
Výsledné odchylky se pohybovali v jednotkách procent. Porovnáme-li vzhled mapy kterou udává výrobce a mapy, která je vytvořena z naměřených bodů a je v podobném rozsahu, zjistíme, že průběh ve střední oblasti obou grafů se liší (viz. Obr. 30).

Tato chyba byla způsobena tím, že se motor měřil jako pohon jedné osy obráběcího stroje (bez zatížení). Při vyslání požadavku pro pohyb na určitý bod, se regulace snaží dostat na požadovaný bod v nejmenším čase. Tzn. motor vyvine veliký moment, který postupně klesá, když se limitně blíží požadovaným otáčkám (viz. Obr. 31). Z toho plyne že naměříme body pouze v části celé účinnostní mapy (např. malé otáčky a malý moment).

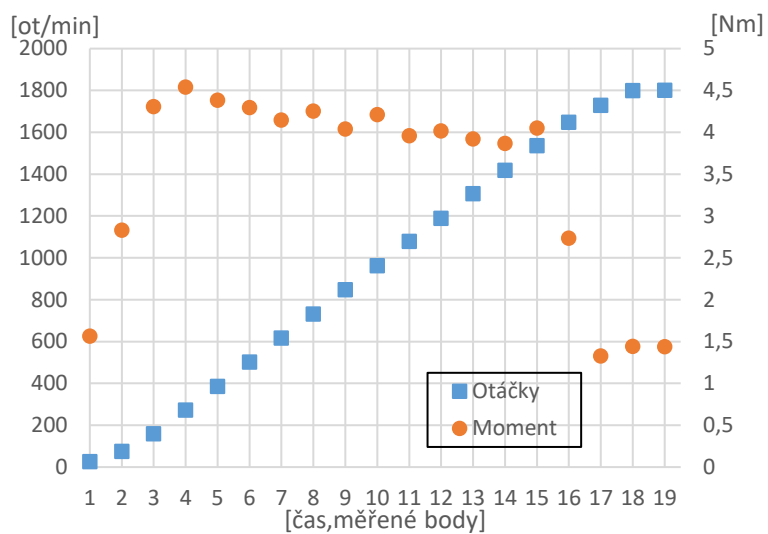
Ke snížení chyby je potřeba změnit postup měření. Navrhují stejný postup jako výrobce (viz. Obr. 32). Tj. měřit účinnost v rovnoměrné mřížce (více momentů pro jedny otáčky).

Tyto grafy si můžeme představit tak, že vodorovná osa jsou měřené body v čase. Podstatné je to, že každý bod na vodorovné ose má dva body na ose svislé (moment a otáčky). Jestliže by měření probíhalo podle Obr. 32, pro jedny otáčky by bylo více měřených bodů (více momentů).

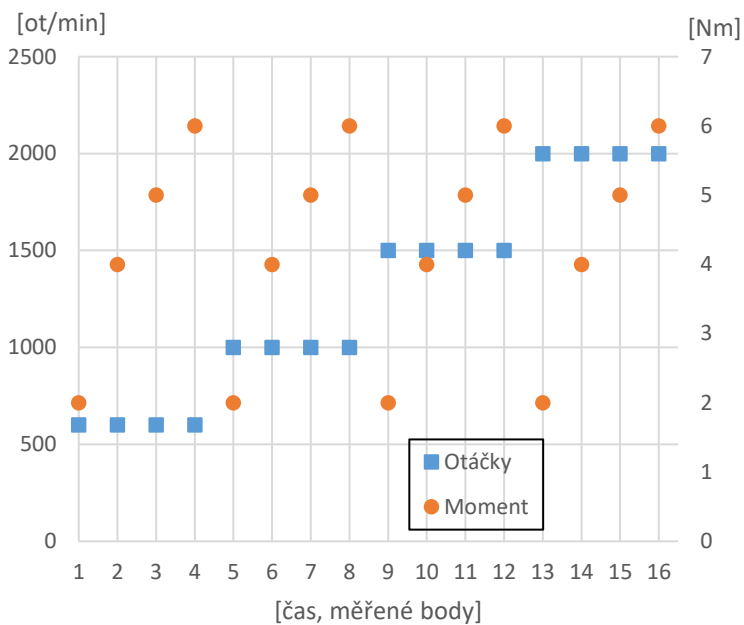
Použitím tohoto způsobu měření, budou data rovnoměrně rozprostřena a bude se moci využít přesnějšího způsobu interpolace (bilineární, bikubická) a výsledná chyba bude zmenšena.



Obr. 30 – Účinnostní mapy v podobném rozmezí (vlevo – udává výrobce, vpravo – vychází z měření)



Obr. 31 – Graf naměřených bodů (žlutá moment, modrá otáčky)



Obr. 32 – Mnou navrhovaný způsob měření bodů (žlutá moment, modrá otáčky)

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Elektrické stroje*. Brno. Skripta. VUT FEKT.
- [2] VEG, Lukáš. *Měření mechanických ztrát asynchronního stroje a porovnání s empirickým výpočtem*. Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky, Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky: Svazek 2*. Vyd. 3. Brno: Zdeněk Novotný, 2004. ISBN 80-214-2743-4.[4] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. Moskva: Mir, 1988. ISBN 04-532-88.
- [5] VAŠÍČEK, Adam. *Omezení spínacích ztrát ve spínaných zdrojích*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT FEKT. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.
- [6] PAVLÍK, Ondřej. *Měnič pro malý 3f asynchronní motor*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VUT FEKT. Vedoucí práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.
- [7] *Features of Ball Screw: THK Co., Ltd.* [online]. [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: https://tech.thk.com/en/products/pdf/en_b15_006.pdf
- [8] What is Lead Screw Efficiency? *PBC Linear* [online]. 2018 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.pbclinear.com/Blog/2018/February/What-is-Lead-Screw-Efficiency-in-Linear-Motion>
- [9] JEŽEK, F. *Geometrické a počítačové modelování*. Plzeň, 2006. Pomocný učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd.
- [10] Hysterezní smyčka. In: *Profi Elektřina* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/terminolog/eterminolog2definition.2006-04-01.3825234139>
- [11] Vířivé proudy. In: *Quora* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.quora.com/How-can-you-explain-an-eddy-current-AC-or-DC>
- [12] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky: Výkonové polovodičové spínané součástky*. Svazek 3. Brno: Zdeněk Novotný, 2014. ISBN 80-214-2742-6.
- [13] ČSN EN 60034-2-1 *Točivé elektrické stroje - Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [14] *Electrical4U* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/model-diagram-of-synchronous-motor/>
- [15] *Technický týdeník* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/sinumerik-840d-sl-sinamics-komplexni-cnc-reseni_21942.html

- [16] *SINUMERIK 840D sl NC variable and interface signals*. 01/2015. ISBN 6FC5397-3CP40-5BA2

- [17] Matlab Answers. In: *MathWorks* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: https://la.mathworks.com/matlabcentral/answers/100813-how-do-i-find-the-indices-of-the-maximum-or-minimum-value-of-my-matrix?s_tid=al_mv

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázky:

<i>Obr. 1 – Zjednodušená interpretace tření rotoru o vzduch</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2 – Hysterezní smyčka, B – magnetická indukce, H – Intenzita magnetického pole (převzato z [10]).....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3 – Vířivé proudy, zobrazeny červeně (převzato z [11])</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4 – Rozdíl ve spínání tranzistoru IGBT (vlevo) a MOS-FET (vpravo). (Převzato a upraveno z [12])</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 5 – Zobrazení použitých veličin a funkce kuličkového šroubu</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 6 – Přímé měření příkonu a výkonu (převzato a upraveno z [13])</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 7 – Součet dílčích ztrát se zkouškou při teplotě odpovídající jmenovitému zatížení a zkouškou nakrátko (převzato a upraveno z [13])</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 8 – Příklad Potierova diagramu (převzato z [14]).....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 9 – Ztráty na motoru udávané výrobcem.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 10 – Metoda nejbližší soused.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 11 – Metoda bilineární</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 12 – Metoda vážené inverzní vzdálenosti</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 13 – Náhodně vygenerované body podle funkce (24).....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 14 – Vygenerované funkční hodnoty, interpretující originální vzhled funkce (počet bodů - 249001)</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 15 – Interpolace na základě známých hodnot z Obr. 13 (tzn. reprodukce vzhledu funkce na základě pouze známých 0,2% dat).....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 16 – Tvar interpolované plochy při $p = 5$</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 17 – Graf skutečných hodnot</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 18 – Interpolace bilineární</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 19 – Interpolace IDW</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 20 – Interpolace nejbližší soused.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 21 – Rozdíly mezi skutečnými a interpolovanými hodnotami. Vlevo nahoře – metoda nejbližšího souseda. Vpravo nahoře – metoda bilineární. Dole – metoda inverzních vzdáleností</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 22 – Princip činnosti programu interpolující pomocí metody nejbližšího souseda.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 23 – Princip funkce programu interpolující pomocí bilineární metody</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 24 – Princip činnosti programu na interpolaci pomocí inverzních vzdáleností</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 25 – Princip činnosti programu zahrnující všechny interpolace</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 26 – Graf z programu volící si vlastní interpolaci</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 27 – Interpolovaná plocha na základě naměřených dat.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 28 – Interpolovaná plocha na základě naměřených dat s přidáním bodem [0;0;0].....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 29 – Interpolovaná plocha na základě naměřených dat s přidáním bodem [0;0;0] a s upraveným vzorcem pro výpočet vah bodů.....</i>	<i>44</i>

<i>Obr. 30 – Účinnostní mapy v podobném rozmezí (nahore – udává výrobce, dole – vychází z měření).....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 31 – Graf naměřených bodů (žlutá moment, modrá otáčky)</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 32 – Mnou navrhovaný způsob měření bodů (žlutá moment, modrá otáčky)</i>	<i>48</i>

Tabulky:

<i>Tab. 1 – Příkazy v jazyce g-code použité při měření</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 2 – Část naměřených hodnot vygenerované systémem SINUMERIC</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 3 – Část upravených naměřených hodnot</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4 – Část dat použitých pro vykreslení účinnostní mapy.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 5 – Účinnost udávaná výrobcem (vodorovně moment, svisle otáčky)</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 6 – Účinnost vycházející z mapy vytvořené z naměřených bodů (vodorovně moment, svisle otáčky)</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7 – Absolutní odchylky v účinnosti (vodorovně moment, svisle otáčky)</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 8 – Data získaná porovnáním naměřených účinností v mapě vytvořené na základě dat udávaných výrobcem (sizer)</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 9 – Data získaná při porovnání v bodech, které nebyly naměřeny, ani je přímo neudává výrobce</i>	<i>46</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – metoda nejbližšího souseda	54
Příloha 2 – metoda bilineární	54
Příloha 3 – metoda vážených inverzních vzdáleností	55
Příloha 4 – program vytvářející účinnostní mapy	55

Příloha 1:

```
function [ Zcl ] = closest_fcn( x,y,X,Y,Z )
for n = 1:length(y)
    for m = 1:length(x)
        for k = 1:length(Y) %X=Z
            r(k) = sqrt((X(k)-x(m))^2 + (Y(k)-y(n))^2);
        end
        [a,b] = minmat(r);
        Zcl(n,m) = Z(b,a);
    end
end

end
```

Příloha 2:

```
function [Zbi] = bili_fce(x,y,X,Y,Z)
for n = 1:length(y)
    for h = 1:length(Y)
        vzy(n,h) = Y(h)-y(n);
    end

    if max(vzy(n,:)) == 0
        lesser_y = find(vzy(n,:) < 0);
        greater_y = find(vzy(n,:) >= 0);
    else
        lesser_y = find(vzy(n,:) <= 0);
        greater_y = find(vzy(n,:) > 0);
    end

    less_idxy = find(vzy(n,:) == max(vzy(n,lesser_y)));
    great_idxy = find(vzy(n,:) == min(vzy(n,greater_y)));

    for m = 1:length(x)
        for p = 1:length(X)
            vzx(m,p) = X(p)-x(m);
        end
        if max(vzx(m,:)) == 0
            lesser_x = find(vzx(m,:) < 0);
            greater_x = find(vzx(m,:) >= 0);
        else
            lesser_x = find(vzx(m,:) <= 0);
            greater_x = find(vzx(m,:) > 0);
        end

        less_idxx = find(vzx(m,:) == max(vzx(m,lesser_x)));
        great_idxx = find(vzx(m,:) == min(vzx(m,greater_x)));

        z1 = ((X(great_idxx)-x(m))/(X(great_idxx)-X(less_idxx)))*Z(less_idxy,less_idxx)+((x(m)-X(less_idxx))/(X(great_idxx)-X(less_idxx)))*Z(less_idxy,great_idxx);
        z2 = ((X(great_idxx)-x(m))/(X(great_idxx)-X(less_idxx)))*Z(great_idxy,less_idxx)+((x(m)-X(less_idxx))/(X(great_idxx)-X(less_idxx)))*Z(great_idxy,great_idxx);
        Zbi(n,m) = ((Y(great_idxy)-y(n))/(Y(great_idxy)-Y(less_idxy)))*z1+((y(n)-Y(less_idxy))/(Y(great_idxy)-Y(less_idxy)))*z2;
    end
end

end

end
```

Příloha 3:

```
function [ Zidw ] = idw_fcn(x,y,X,Y,Z);
R = 1;%radius
p = 6;
s = 0.5;
%pri porovnani s=0.5,p=6,R=1
for n = 1:length(y)
    for m = 1:length(x)
        sum1 = 0;
        sum2 = 0;
        flag = 0;
        for k = 1:length(X)%=Y=Z

            r(k) = sqrt((X(k)-x(m))^2 + (Y(k)-y(n))^2);
            if r(k) == 0
                [min1,min2] = minmat(r);
                flag = 1;
            elseif r(k) ~= 0 && r(k)<R
                sum1 = sum1 + Z(k)/((r(k)+s)^p);
                sum2 = sum2 + 1/((r(k)+s)^p);
            end
        end
        if flag == 1
            Zidw(n,m) = Z(min2,min1);
        else
            Zidw(n,m)= sum1/sum2;
        end
    end
end
```

pozn. funkce minmat() byla převzata z [17]. Jedná se o funkci pro nalezení minima z matice

Příloha 4:

```
clc

close all
%% Příklady vstupních dat
%% První možnost
% % clear all
% % Xn =[600 750 990 1500 2010 3000];
% % Yn =[2.72 4.08 5.44 6.80]; %V Nm
% %
% % X = Xn/max(Xn);
% % Y = Yn/max(Yn); %v procentech
% % Z = [0.850674 0.876862 0.903483 0.895235 0.891055 0.876862;
% %      0.836790 0.865026 0.894288 0.901531 0.914784 0.907917;
% %      0.810339 0.842289 0.875772 0.904713 0.912354 0.914394;
% %      0.795256 0.816534 0.854541 0.891499 0.910902 0.918325];

%% Druhá možnost
D = table2array(D);

Xn = D(:,1);
Yn = D(:,2);
Z = D(:,3);

X = Xn/max(Xn);
Y = Yn/max(Yn);

%%

disp('Zadej hledaný bod v Nm:');
mom = '';
mom = input(mom,'s');
mom = str2double(mom);

disp('Zadej hledaný bod v ot/min:');
ot = '';
```

```

ot = input(ot, 's');
ot = str2double(ot);

hby = mom/max(Yn); % např: 6,8=>0,68v pro rovnomerne Yn a Xn
hbx = ot/max(Xn); % např: 1200=>1,2
%hby = mom;
%hbx = ot;

x = [min(X):0.02:max(X)];
y = [min(Y):0.02:max(Y)];
[r,c] = size(Z);

if c > 1 %rovnoměrné => bili, popř cubical
    Zbi = bili_fce(x,y,X,Y,Z);
    Zint = bili_fce(hbx,hby,X,Y,Z)
    surf(x*max(Xn),y*max(Yn),Zbi);
    xlabel('n[ot/min]')
    ylabel('M[Nm]')
    zlabel('účinnost[-]')
    hold on
    plot3(hbx*max(Xn),hby*max(Yn),Zint, '+', 'color', 'r', 'MarkerSize', 20);

elseif c == 1 && (max(r)<=10) %náhodné body v prostoru (malo bodu) => closest
    Zcl = closest_fcn(x,y,X,Y,Z);
    Zint = closest_fcn(hbx,hby,X,Y,Z)
    surf(x*max(Xn),y*max(Yn),Zcl);
    xlabel('n[ot/min]')
    ylabel('M[Nm]')
    zlabel('účinnost[-]')
    hold on
    plot3(hbx*max(Xn),hby*max(Yn),Zint, '+', 'color', 'r', 'MarkerSize', 20);

elseif c == 1 && max(r)>10 %náhodné body v prostoru (vice bodu) => idw
    Zidw = idw_fcn(x,y,X,Y,Z);
    Zint = idw_fcn(hbx,hby,X,Y,Z)
    surf(x*max(Xn),y*max(Yn),Zidw);
    xlabel('n[ot/min]')
    ylabel('M[Nm]')
    zlabel('účinnost[-]')
    hold on
    plot3(hbx*max(Xn),hby*max(Yn),Zint, '+', 'color', 'r', 'MarkerSize', 20);
    plot3(Xn,Yn,Z, '*', 'color', 'b', 'MarkerSize', 10);

end

```